

**SVERIGES
LANTBRUKSUNIVERSITET**

DIMENSIONERING AV NATURLIG VENTILATION

Anders Ehrlemark

**Institutionen för lantbruksteknik
Avdelningen för byggnadsvetenskap**

**Rapport 197
Report**

**Swedish University of Agricultural Sciences
Department of Agricultural Engineering
Building Design Section**

**Uppsala 1995
ISSN 0283-0086
ISRN SLU-LT-R--197--SE**

INNEHÅLL

| | |
|--|----|
| FÖRORD | 2 |
| BETECKNINGAR OCH SYMBOLER | 4 |
| SAMMANFATTNING | 5 |
| Bakgrund | 5 |
| Beräkning av dimensionerande ventilationsflöde | 5 |
| Dimensioneringsregler för värmeisolerade stallar med kontrollerat klimat | 6 |
| Dimensioneringsregler för oisolerade stallar | 6 |
| Värme-, fukt och koldioxidproduktion i stallet | 6 |
| Utformning av anläggningar för naturlig ventilation | 7 |
| Praktiska synpunkter på utformning av naturlig ventilation | 7 |
| INLEDNING | 8 |
| TEORETISK BAKGRUND | 8 |
| Strömningsförluster | 9 |
| Skorstenseffekt | 12 |
| Vindpåverkan | 14 |
| BERÄKNING AV VENTILATIONSBEHOV | 16 |
| Energi- och massbalans bestämmer stallklimatet | 16 |
| Ventilationsbehov i värmeisolerade stallar | 19 |
| Ventilationsbehov i oisolerade stallar | 20 |
| Värme-, fukt och koldioxidproduktion i stallet | 25 |
| DIMENSIONERING AV ANLÄGGNINGAR FÖR NATURLIG VENTILATION | 27 |
| Dimensioneringsförutsättningar | 27 |
| Dimensionering med hänsyn till skorstenseffekt | 32 |
| Flöde orsakat av vindpåverkan | 35 |
| Kombinerad skorstenseffekt och vindpåverkan | 37 |
| PRAKTISKA SYNPUNKTER PÅ UTFORMNING AV NATURLIG VENTILATION | 44 |
| Byggnadens placering och utformning | 44 |
| Val och placering av ventilationsöppningar | 45 |
| Dimensionering och reglering | 49 |
| REFERENSER | 50 |
| BILAGOR | 52 |
| Bilaga 1: Förlustkoefficient för ventilationsöppningar | 52 |
| Bilaga 2: Fuktig lufts densitet | 55 |
| Bilaga 3: Vindhastighetsdata | 57 |

BETECKNINGAR OCH SYMBOLER

| | |
|---------------|--|
| A | area [m^2] |
| c_p | specifik värmekapacitet [$\text{Wh}/\text{m}^3 \cdot \text{C}$] |
| C_{pe} | vindtryckskoefficient, yttre |
| C_{pi} | vindtryckskoefficient, inre |
| d | diameter [m] |
| F | fuktavgivning [$\text{kg H}_2\text{O}/\text{h}$] |
| g | tyngdkraftsacceleration, $9,81 \text{ m/s}^2$ |
| h | höjd [m] |
| H | höjdskillnad [m] |
| K | koldioxidproduktion [$\text{kg CO}_2/\text{h}$] |
| L | längd [m] |
| m_v | masskoncentration av vatten [$\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg luft}$] |
| m_k | masskoncentration av koldioxid [$\text{kg CO}_2/\text{kg luft}$] |
| M | molmassa [kg/mol] |
| n | antal |
| p | tryck [Pa] |
| P | värmeeffekt [W] |
| q | flöde [m^3/h] |
| R | gaskonstanten [$R \approx 8,3143 \text{ J}/\text{mol} \cdot \text{K}$] |
| t | temperatur [$^{\circ}\text{C}$] |
| T | temperatur [K] |
| U | U-värde [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] |
| w | hastighet [m/s] |
| w_{10} | vindhastighet på 10 meters höjd |
| z | höjdkoordinat [m] |
| α | kontraktionskoefficient |
| ε | förhållandet mellan två molmassor |
| φ | luftens relativa fuktighet |
| λ | friktionsfaktor |
| ρ | densitet [kg/m^3] |
| ζ | förlustkoefficient |

SAMMANFATTNING

Med begreppet "naturlig ventilation" avses ventilation som orsakas av skorstenseffekten eller av vindpåverkan. De grundläggande ventilationstekniska principerna är de samma både för naturlig och mekanisk ventilation i såväl isolerade som oisolerade hus. Skillnaden är att de naturliga drivkrafterna är svagare och svårare att kontrollera än de drivkrafter som alstras av fläktar. En väl fungerande naturlig ventilation kan därför inte åstadkommas genom "teknisk råstyrka" utan måste bygga på ett intelligent utnyttjande av naturkrafterna. Detta kan åstadkommas genom en omsorgsfull dimensionering, utformning och skötsel av anläggningen.

Bakgrund

Syftet med ventilation är att skapa en bra stallmiljö genom att tillföra frisk uteluft samtidigt som gaser, fukt och överskottsvärme transporteras bort med frånluften. För att transportera luften krävs en skillnad i lufttryck (drivtryck) mellan inlopp och utlopp. I en anläggning med naturlig ventilation skapas detta drivtryck av skillnader i densitet mellan inne- och utomhusluft (skorstenseffekt, självdrag) och av vinden.

Den s.k. skorstenseffekten beror på skillnader i densitet mellan ute- och inneluft. I ett djurstall avger djuren värme, vilket medför att stallluften blir varmare än uteluften. Detta ger upphov till en skillnad i densitet mellan ute- och inneluft och därmed en tryckskillnad som kan utnyttjas för att ventilerastallet. De tryckskillnader (drivtryck) som skorstenseffekten ger upphov till är mycket små. Typiska värden ligger i intervallet 0,5 - 10 Pa (0,05 - 1 mm vp) vilket skall jämföras med 30-100 Pa i anläggningar med mekanisk ventilation.

När vinden möter ett hinder i sin väg (t.ex. ett hus) tvingas luftströmmen ändra riktning för att komma runt hindret. I anslutning till dessa riktnings- och hastighetsförändringar kommer det att uppträda zoner med förhöjt eller sänkt statiskt lufttryck. Tryckfördelningen beror på byggnadens form och på vindriktningen. Generellt gäller att det råder övertryck på vindsidan av en byggnad och undertryck på läsidan. I anslutning till hörn och skarpa kanter kan det lokalt uppträda mycket stora undertryck.

Beräkning av dimensionerande ventilationsflöde

Dimensionering av en anläggning för naturligt ventilation görs alltid i två steg. Först beräknar man vilket ventilationsflöde som behövs. Därefter kan man dimensionera och placera ut ventilationsöppningarna. Även om de fysikaliska grundprinciperna är de samma använder man olika dimensioneringsregler för värmeisolerade och oisolerade stallar.

Dimensioneringsregler för värmeisolerade stallar med kontrollerat klimat

Erforderlig ventilationskapacitet för värmeisolerade stallar med kontrollerat klimat beräknas på samma sätt som för fläktventilerade stallar. Det innebär i korthet att man skall beräkna ett vinterventilationsflöde (minimiventilation) och ett sommarventilationsflöde (maximiventilation). Minimiventilationsflödet är det flöde som krävs för att vintertid inte överskrida föreskriven högsta relativa fuktighet och koldioxidhalt i stallet. Maximiventilationsflödet beräknas så att övertemperaturen i stallet sommartid, vid +21°C utomhus och dimensionerande lägsta vindhastighet, är mer än +4°C.

Dimensioneringsregler för oisolerade stallar

I ett oisolerat stall skall byggnaden ge skydd mot nederbörd och vind. Temperatur och fuktighet kommer i första hand att bestämmas av utomhusklimatet. När det gäller de högsta tillåtna halterna av föroreningar i stalluften så skiljer sig inte oisolerade stallar från värmeisolerade. Enligt Jordbruksverkets föreskrifter får djur endast tillfällighetsvis utsättas för en koldioxidhalt som överskrider 3000 ppm. Jordbruksverkets anvisningar innehåller också en föreskrift om att den relativa fuktigheten i oisolerade stallar inte annat än undantagsvis får överskrida uteluftens fuktighet med mer än 10 procentenheter.

Genom simulering av stallklimatet under olika klimatförhållanden kan man visa att det ventilationsflöde som krävs för att sommartid hålla övertemperaturen i stallet under 4-5°C är tillräckligt för att under den kalla årstiden uppfylla kravet att luftfuktigheten inne inte bör överstiga uteluftens relativa fuktighet med mer än 10% samtidigt som koldioxidhalten hålls låg.

Vi föreslår därför att det lägsta godtagbara ventilationsflödet i naturligt ventilerade och oisolerade djurstallar skall beräknas så att koldioxidhalt i stallet inte överskrider gränsvärdet 3000 ppm och så att övertemperaturen i stallet inte överskrider 5°C när utomhustemperaturen är +21°C. Att man bör kunna tillåta en högre övertemperatur i oisolerade stallar kan motiveras med de lägre kraven på klimatkontroll och svårigheten att uppnå tillräckligt ventilationsflöde vid små temperaturskillnader och svag vind. Olägenheten av den högre övertemperaturen begränsas av att perioder då det både är vindstilla och varmt är ovanliga.

Värme-, fukt och koldioxidproduktion i stallet

Djurens värme- fukt och koldioxidproduktionen i naturligt ventilerade stallar skiljer sig inte från vad som gäller för mekaniskt ventilerade stallar. I oisolerade stallar måste man dock vara uppmärksam på att uppvärmning som orsakas av solinstrålningen samt värme- och fuktavgivningen från ströbäddar få stor betydelse för ventilationsbehovet.

Anvisningar för hur djurens värme-, fukt och koldioxidavgivning skall beräknas finns i Svensk standard. I oisolerade stallar med begränsad klimatkontroll råder andra temperaturförhållanden än i isolerade stallar med kontrollerat klimat. Därför måste fukt och värmeavgivningen beräknas enligt grundformlerna i SS 95 10 50.

I oisolerade byggnader är det vanligt med ströbäddar. Komposteringsprocessen i sådana bäddar producerar avsevärda mängder fukt och koldioxid. Solinstrålning mot transparenta eller oisolerade tak och väggar kan orsaka en avsevärd värmebelastning i oisolerade stallar. I byggnader med transparent tak och/eller väggar kan värmetillskottet bli ännu större.

Utformning av anläggningar för naturlig ventilation

Det andra steget i projekteringen är att bestämma typ, storlek och placering av ventilationsöppningarna. Till skillnad från vad som gäller för mekanisk ventilation så bestäms kapaciteten i anläggningar med naturlig ventilation av till- och frånluftsöppningarnas inbördes placering.

När temperaturskillnaden mellan stallet och uteluften är liten kommer vinden att få avgörande betydelse för om ventilationsflödet blir tillräckligt. Beräkningar visar att även i en byggnad som är utformad för att i första hand utnyttja skorstenseffekten, så kommer vindtrycket att få en dominerande betydelse för ventilationsflödet redan vid så låga vindhastigheter som ca 1,5 m/s.

Eftersom vindhastigheten har så stor betydelse för ventilationen i naturligt ventilerade stallar är det viktigt att välja rätt dimensionerande vindhastigheten. Den bör väljas så låg att den endast undantagsvis underskrids i samband med hög utetemperatur. Beroende på var man befinner sig i landet och hur terrängen ser så kan man räkna med en lägsta dimensionerande vindhastighet från 0,3 till 1,0 m/s.

Praktiska synpunkter på utformning av naturlig ventilation

I byggnader med naturlig ventilation kan byggnadens form liksom dess orientering i förhållande till förhärskande vindriktning ha stor betydelse för anläggningens funktion. Andra viktiga faktorer är placeringen i förhållande till andra byggnader och olika hinder i terrängen.

Eftersom drivkrafterna är små krävs mycket större ventilationsöppningar i anläggningar som bygger på naturlig ventilation jämfört med mekanisk ventilation. Det betyder att de flesta av de konventionella ventilationsdon som finns på marknaden har för liten kapacitet för att passa i stallar med naturlig ventilation. Det är bra om man har reservöppningar som kan öppnas i samband med varmt och stilla väder. Dessa extra ventilationsöppningar kan utgöras av lämpligt placerade portar, fönster eller luckor.

De luft rörelser som orsakas av skorstenseffekten liknar de som uppträder i stallar med fläktventilation, men eftersom drivkraften är svag blir luft hastigheterna i tillufts donen låga (mindre än 1 m/s). Detta minskar den möjliga kastlängden och därmed möjligheterna att styra luft rörelserna i stallet.

I ett stall som skall utnyttja vind driven ventilation bör vara utformat så att man får en jämn genomluftning utan "döda" zoner eller drag direkt på djuren. Ventilationsöppningarna bör därför vara jämt fördelade runt hela stallet. Det bästa och jämnaste inomhusklimatet får man och huset kan placeras med en långsida mot den förhärskande vindriktningen. Eftersom

vindens riktning växlar kommer en viss ventilationsöppning ibland att fungera som tilluftsdon och ibland som frånluftsdon.

INLEDNING

Syftet med denna skrift är att ge det teoretiska underlag som behövs för att utforma och sköta ventilationsanläggningar som baseras på naturlig ventilation. Med begreppet "naturlig ventilation" avses ventilation (luftutbyte) som orsakas av skorstenseffekten eller av vindpåverkan. De grundläggande ventilationstekniska principerna är de samma både för naturlig och mekanisk ventilation i såväl isolerade som oisolerade hus. Skillnaden är att de naturliga drivkrafterna är svagare och svårare att kontrollera än de drivkrafter som kan alstras med fläktar. En väl fungerande naturlig ventilation kan därför inte åstadkommas genom "teknisk råstyrka" utan måste bygga på ett intelligent utnyttjande av naturkrafterna. Detta kan åstadkommas genom en omsorgsfull dimensionering, utformning och skötsel av anläggningen.

De grundläggande fysikaliska principerna för naturlig ventilation är ganska enkla, men beräkningsarbetet kan bli komplicerat för byggnader med många ventilationsöppningar och om man vill ta hänsyn till den kombinerade effekten av både skorstenseffekt och vind. I det följande kommer både förenklade och avancerade beräkningsmetoder att redovisas. De förenklade metoderna kan användas för överslagsberäkningar för fall med okomplicerade dimensioneringsförutsättningar. De avancerade metoderna är mer generellt användbara men kräver datorstöd för att vara praktiskt användbara.

Avslutningsvis kommer en del praktiska synpunkter att lämnas på byggnadsplacering och utformning med hänsyn till den naturliga ventilationen.

TEORETISK BAKGRUND

Syftet med ventilation är att skapa en bra stallmiljö genom att tillföra frisk uteluft samtidigt som gaser, fukt och överskottsvärme transporteras bort med frånluften. För att transportera luft genom ett ventilationssystem krävs en tryckskillnad (drivtryck) mellan systemets inlopp och utlopp. I en anläggning med naturlig ventilation skapas detta drivtryck av skillnader i densitet mellan inne- och utomhusluft (skorstenseffekt) och av vinden. När luften rör sig genom systemet uppstår tryckförluster p.g.a. friktion i kanaler och don. Tryckförlusterna blir större ju högre luftens strömningshastighet är. Strömningshastigheten kommer att bli så stor att tryckförlusterna precis motsvarar det tillgängliga drivtrycket. Detta grundläggande förhållande kan användas för att beräkna flöden och dimensionera en ventilationsanläggning.

Strömningsförluster

Vid endimensionell friktionsfri strömning gäller Bernoullis ekvation:

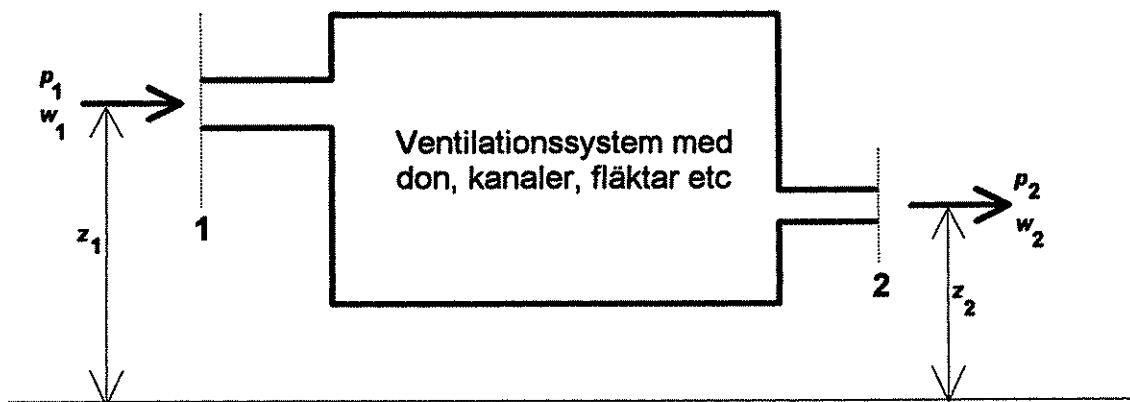
$$p + \frac{\rho w^2}{2} + \rho g z = \text{konstant} \quad (1)$$

där p = statiskt tryck [Pa]
 ρ = densitet [kg/m³]
 w = strömningshastighet [m/s]
 g = tyngdkraftsaccelerationen, 9,81 m/s²
 z = höjdkoordinat (läge) [m]

Ekvationens andra term kallas det *dynamiska trycket* och den tredje termen *höjdtrycket*. I ett ventilationssystem kan normalt inte friktionsförlusterna försummas, men en utvidgad form av ekvationen kan användas för att beskriva sambandet in- och utflöde i systemet:

$$p_1 + \frac{\rho w_1^2}{2} + \rho g z_1 = p_2 + \frac{\rho w_2^2}{2} + \rho g z_2 + \Delta p_f + \Delta p_w \quad (2)$$

Som figur 1 visar hör parametrar med index 1 till inloppet och index 2 till utloppet på systemet. Termen Δp_f står för de tryckförluster som orsakas av friktion i systemet och Δp_w för de tryckförluster som orsakats av att luften utfört ett arbete. I system som bygger på naturlig ventilation är normalt $\Delta p_w = 0$ eftersom det inte finns några fläktar. Höjdkoordinaten (z) anges i förhållande till ett godtyckligt men enhetligt referensplan.



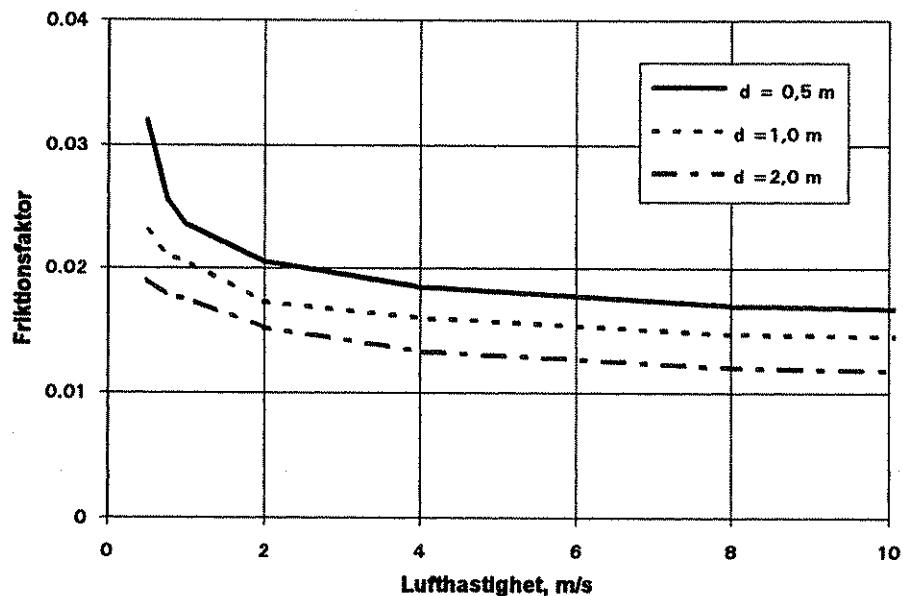
Figur 1 Principskiss av ett ventilationssystem. Parametrarna p_1 (tryck), w_1 (hastighet) och z_1 (höjdkoordinat) avser luftströmmen i inloppet (1) och p_2 , w_2 och z_2 är motsvarande värden i utloppet (2).

Tryckförlusterna i kanaler och ventilationsdon kan beräknas med formeln:

$$\Delta p_f = \sum \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho w^2}{2} + \sum \zeta \frac{\rho w^2}{2} \quad (3)$$

där λ = friktionsfaktor
 L = längd [m]
 d = diameter [m]
 ρ = luftens densitet [kg/m³]
 w = strömningshastighet [m/s]
 ζ = förlustkoefficient

Den första termen är summan av tryckförlusterna i raka kanaldelar och den andra termen är summan av de engångsförluster som orsakas av kanalkrökar, inlopp, utlopp, spjäll etc. Friktionsfaktorn (λ) beror på hur skrovliga kanalväggarna är (se figur 2) och på hur turbulent flödet är. Graden av turbulens beror på strömningshastighet (w , m/s), kanaldiameter (d , m) samt luftens kinematiska viskositet (ν , m²/s) och brukar karakteriseras med hjälp av Reynolds tal; $Re = wd/\nu$. I ventilationssystem som bygger på naturlig ventilation är luftkanaler ovanliga med undantag för självdragstrummor. Friktionsförlusterna i en sådan trumma är normalt små i förhållande till engångsförlusterna i trummans in- och utlopp. Först om trummans längd är ca 50 gånger större diametern blir friktionsförlusten i trumman av samma storleksordning som engångsförlusterna.



Figur 2 Friktionsfaktor beräknad för rör med väggar av galvaniserad plåt eller annat material med motsvarande ytstruktur. Diagrammets värden svarar mot Reynolds tal i intervallet $2 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^6$ (beräknat efter Peterson, 1978).

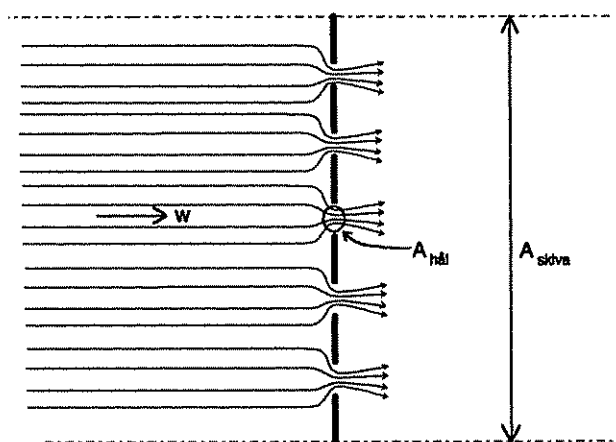
Engångsförlusten i en systemkomponent bestäms av förlustkoefficienten ζ , vars värde påverkas av komponentens utformning och Reynolds tal. Förlustkoefficienten kan inte beräknas utan måste bestämmas genom provning. Koefficienter för kanalkrökar, förgreningar

e.t.c. finns tabellerade i facklitteraturen (Peterson, 1978; Avén, 1982). Bilaga 1 innehåller uppgifter om förlustkoefficienter för ett stort antal öppningar och don som används i stallar med naturlig ventilation.

Förlustkoefficient och kontraktionskoefficient

Kontraktionskoefficient (α) och förlustkoefficient (ζ) är två olika sätt att ange hur mycket strömningen begränsas av en ett hinder. När gas eller vätska strömmar genom hål i en vägg eller behållare pressas flödet ihop så att strålens tvärsnittsarea blir mindre än öppningens area. Graden av förträngning beror på hålkanternas form och den brukar beskrivas med hjälp av kontraktionskoefficienten som är förhållandet mellan strålens area och öppningens area. För ett litet skarpkantat hål i en tunn vägg är kontraktionskoefficienten (α) ca 0,6. Strömningsmotståndet blir lägre om mindre om behållarens vägg är tjocka och hålets kanter rundade. Kontraktionskoefficienten blir då större än 0,6.

Förlustkoefficienten (ζ) anger hur stort strömningsmotstånd som ett hinder eller förträngning i en kanal orsakar. Förlustkoefficienten bestäms genom att mäta tryckfall och flödes-hastighet genom t.ex. ett ventilationsdon eller ett stycke vindsyddsväv (jfr ekvation 3). Ju större motståndet är desto större är värdet på förlustkoefficienten. Både kontraktionskoefficient och förlustkoefficient påverkas i viss mån av Reynolds tal. Denna variation är dock utan praktisk betydelse under de förhållanden som är aktuella i anläggningar för naturlig ventilation.



Figur 3 Strömning genom luftgenomsläpplig skiva eller väv. Skivans förlustkoefficient (ζ) kan beräknas om man mäter lufthastigheten w och tryckfallet över en skiva med arean A_{skiva} ($A_{skiva} \gg A_{hål}$).

För en enskild öppning i en vägg av glespanel eller en luftgenomsläpplig skiva kan man tillämpa metoden med kontraktionskoefficient. För en hel vägg är det dock mer praktiskt att genom provning fastställa förlustkoefficienten för en provsektion. Eftersom man inte behöver mäta de enskilda hålens area kan denna metod också användas för material med svårdefinierbara hål som t.ex. porösa skivor eller luftgenomsläpplig väv.

Skorstenseffekt

Den s.k. skorstenseffekten beror på skillnader i densitet mellan ute- och inneluft. Luftens densitet beror på lufttryck, lufttemperatur och fukttinnehåll. I ett stall producerar djuren värme vilket medför att stallluften blir varmare än uteluften. Detta ger upphov till en skillnad i densitet och därmed en tryckskillnad som kan utnyttjas som drivkraft för ventilationen. Luftens densitet påverkas också av hur mycket fukt (vattenånga) som den innehåller, men denna effekt har i allmänhet liten betydelse i jämförelse med temperaturens inverkan. De tryckskillnader (drivtryck) som skorstenseffekten ger upphov till är mycket små, typiska värden ligger i intervallet 0,5 - 10 Pa (0,05 - 1 mm vp).

Lufttrycket (p , [Pa]) beror på höjden (z , m) över havet och luftens densitet (ρ , kg/m³):

$$p = \rho g z \quad (4)$$

Monteith & Unsworth (1990) beräknar densiteten för torr luft med hjälp av formeln:

$$\rho_0 = \frac{p_{TOT} M_L}{RT} \quad (5)$$

där ρ_0 = den torra luftens densitet [kg/m³]
 p_{TOT} = det totala lufttrycket [Pa]
 M_L = luftens molmassa [$M \approx 0.02894$ kg/mol]
 R = gaskonstanten [$R \approx 8,3143$ J/(mol·K)]
 T = luftens temperatur [K]

Densiteten för fuktig luft (ρ , kg/m³) kan sedan beräknas med kännedom om förhållandet mellan vattenångans och luftens molmassa $\varepsilon = M_v/M_L \approx 0.622$ samt vattenångans partialtryck (p_p , Pa):

$$\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{p_p (1 - \varepsilon)}{p_{TOT}} \right) \quad (6)$$

Vattenångans partialtryck är proportionellt mot luftens innehåll av vattenånga. Det partialtryck som råder i fuktmättad luft (100 % relativ fuktighet) kallas vattenångans mättnadstryck. Mättnadstrycket beror på luftens temperatur. I ASAE Standards (ASAE, 1986) och liksom hos Monteith & Unsworth (1990) finns empiriska formler för vattenångans mättnadstryck inom vissa temperaturintervall. Tabellerade värden på mättnadstrycket finns bl.a. i Mörtstedt & Hellsten (1985). Med kännedom om mättnadstrycket (p_m , Pa) och luftens relativa fuktighet (ϕ , %) kan partialtrycket beräknas:

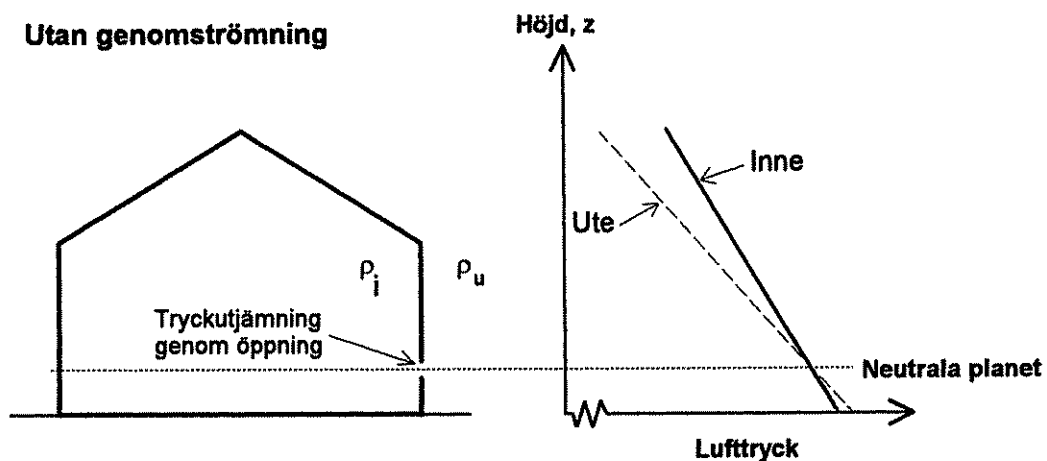
$$p_p = \frac{p_m \cdot \phi}{100} \quad (7)$$

Värden på luftens densitet vid olika temperaturer och med olika fukttinnehåll finns tabellerade i bilaga 2.

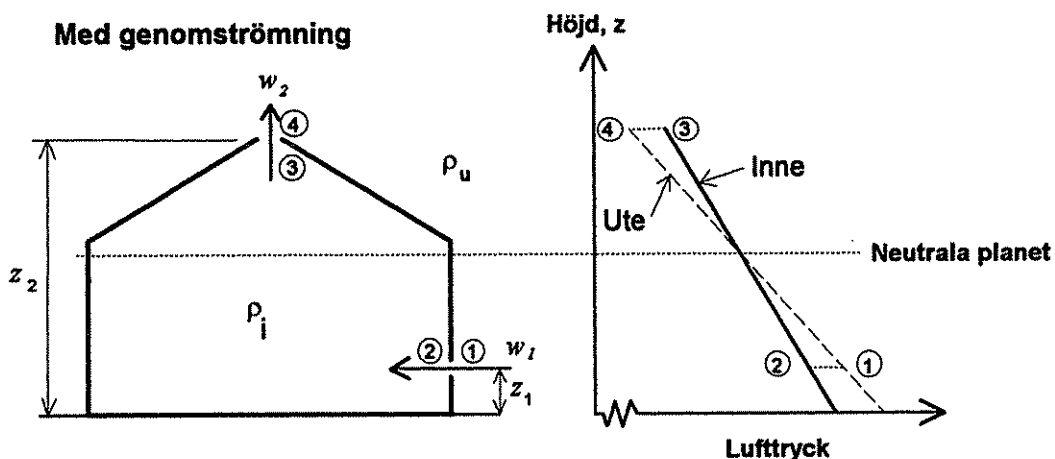
Figur 4 visar schematiskt hur lufttrycket utomhus avtar när höjden (z) ökar (den streckade linjen). Lufttrycket avtar snabbare ju större luftens densitet är. Om det finns en liten öppning i byggnaden kommer trycket på denna nivå vara lika både inne och ute (det neutrala planet). Om luftens densitet inomhus är lägre ($\rho_i < \rho_u$) avtar lufttrycket långsammare med

ökad höjd (heldragen linje) än utomhus. Detta medför att det uppstår en tryckskillnad mellan inne och uteluft. Tryckskillnadens storlek beror på skillnaden i densitet och på höjden i förhållande till det neutrala planet.

Om det finns flera öppningar på olika höjd i byggnaden (figur 5) orsakar tryckskillnaden en luftström genom byggnaden. Det tryckfall som uppstår när luften strömmar genom till- och frånluftsöppningarna gör att lufttrycket i byggnaden förändras i förhållande till situationen utan luftströmning. De kurvor som beskriver trycket i huset har fortfarande samma lutning (beror på ρ_i och ρ_u) som i figur 4. De tryckfall som uppträder när luften strömmar ut och in i byggnaden medför att kurvan för ineluftsens tryck kommer dock att förskjutas i förhållande till kurvan för uteluften. Detta påverkar dessutom det neutrala planets läge.



Figur 4 Lufttryck inuti (heldragen kurva) och utanför (streckad linje) en byggnad när ineluftsens densitet är mindre (ρ_i) än uteluftsens (ρ_u). Inneluften står i förbindelse med uteluften via en öppning, men ingen luft strömmar in i eller ut ur byggnaden.



Figur 5 Lufttryck inne och ute när det finns öppningar så att luft kan strömma genom byggnaden. Inneluftsens densitet är mindre än uteluftsens ($\rho_i < \rho_u$). Strömningshastigheten i öppningarna är w_1 respektive w_2 m/s. Neutrala planet är den nivå där trycket inne och ute är lika.

Lufttrycket i en punkt i lufrummet är oberoende av vilken väg man följer för att komma till punkten. Det betyder att om man följer en sluten bana skall summan av alla tryckförändringar längs vägen bli noll. De betyder att för slingan $\textcircled{1} \rightarrow \textcircled{2} \rightarrow \textcircled{3} \rightarrow \textcircled{4} \rightarrow \textcircled{1}$ i figur 5 kan man skriva:

$$-\zeta_1 \cdot \frac{\rho_u w_1^2}{2} - (z_2 - z_1) g \rho_i - \zeta_2 \cdot \frac{\rho_i w_2^2}{2} + (z_2 - z_1) g \rho_u = 0 \quad (8)$$

I ekvation 7 har antagits att lufthastigheterna inne i byggnaden och utanför är så små att friktionsförlusterna kan försummas. Om man arrangerar om uttrycket finner man att drivtrycket (den tryckskillnad som orsakas av densitets- och höjdskillnaden) är lika stort som tryckfallet i ventilationsöppningarna:

$$(\rho_u - \rho_i)(z_2 - z_1)g = \zeta_1 \cdot \frac{\rho_u w_1^2}{2} + \zeta_2 \cdot \frac{\rho_i w_2^2}{2} \quad (9)$$

Detta förhållande gäller generellt, men beräkningarna blir mycket mer komplicerade i de fall man har flera olika öppningar placerade på olika höjd. Bruce (1978) har beskrivit en generell metod som kan användas i dessa fall.

Vindpåverkan

När vinden möter ett hinder i sin väg (t.ex. ett hus) tvingas luftströmmen ändra riktning för att komma runt hindret. I anslutning till dessa riktnings- och hastighetsförändringar kommer det att uppträda zoner med förhöjt eller sänkt statiskt lufttryck. När det gäller byggnader brukar man använda en tryckkoefficient, C_p , för att beskriva tryckfördelningen över byggnadens olika yttertor. Tryckkoefficienten är ett mått på hur stor del av den fria luftströmmens dynamiska tryck som omvandlas till ett statiskt tryck (p , Pa) mot en given yta:

$$p = C_p \frac{\rho w_{10}^2}{2} \quad (10)$$

Som mått på den fria luftströmmens hastighet brukar man oftast använda vindhastigheten på den meteorologiska standardhöjden 10 meter (w_{10} , m/s). I en byggnad där det finns ventilationsöppningar kommer vinden inte bara att bestämma tryckförhållandena på byggnadens yttertor utan också påverka lufttrycket inne i byggnaden. Den tryckskillnad (Δp) som vinden orsakar mellan utsida och insida beräknas med hjälp av den yttre (C_{pe}) och den inre (C_{pi}) tryckkoefficienten:

$$\Delta p = (C_{pe} - C_{pi}) \frac{\rho w_{10}^2}{2} \quad (11)$$

Den yttre tryckkoefficienten beror på byggnadens form och vindriktningen. Det finns inga enkla samband som kan användas för att beräkna denna koefficienten. Publicerade värden bygger på prov med modeller och fullskalemätningar. Den inre tryckkoefficientens värde ligger mellan de tryckkoefficientsvärden som svarar mot övertrycket på byggnadens vind-sida respektive undertrycket på dess läsida. Den inre tryckkoefficienten kan beräknas med kännedom om de yttre koefficienterna och de tryckfall som uppträder i ventilationsöpp-

ningarna (som beror på öppningarnas storlek, förlustkoefficient och placering). Den inre tryckkoefficienten är lika för alla innerytor i ett rum.

Ekvation 3 tillämpad på en ventilationsöppning ger

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho w^2}{2} \quad (12)$$

Genom att kombinera ekvation 11 och 12 kan man få en ekvation som beskriver sambandet mellan lufthastigheten i donet (w), förlustkoefficienten (ζ), vindhastigheten (w_{10}) samt den yttre (C_{pe}) och inre (C_{pi}) tryckkoefficienten (Bruce, 1975a):

$$w^2 = w_{10}^2 \frac{(C_{pe} - C_{pi})}{\zeta} \quad (13)$$

Låt ett positivt värde på w beteckna strömningsriktning in i stallet och ett negativt värde att luften strömmar ut. Ekvation 13 kan då omformas så att den ger sambandet mellan vindhastigheten och hastigheten (med tecken) i det n :te donet:

$$w_n = w_{10} \frac{(C_{pe_n} - C_{pi})}{\sqrt{\zeta \cdot |C_{pe_n} - C_{pi}|}} \quad (14)$$

Eftersom vi inte känner C_{pi} kan denna ekvation ännu inte användas för beräkna hastigheten. Vi vet dock att summan av alla ut- och inflöden skall vara noll. Eftersom hastigheten w_n är positiv vid inflöde och negativ vid utflöde gäller:

$$\sum_n A_n w_n = 0 \quad (15)$$

Den inre tryckkoefficienten, C_{pi} , kan beräknas med hjälp av successiva approximationer till dess att villkoret om lika stora in- och utflöden uppfylls. När vi funnit ett värde på C_{pi} , som gör att ekvation 15 uppfylls, har vi samtidigt beräknat lufthastigheterna w_n (med ekvation 13) i de olika ventilationsöppningarna.

Generellt gäller att den yttre vindtryckskoefficienten, C_{pe} , är positiv (tryck) på vindsidan av en byggnad och negativ (undertryck) på läsidan. Om luftströmmen passerar en skarp kant eller ett hörn kan det hända att den släpper från ytan och det bildas virvlar. I sådana zoner kan det lokalt uppträda mycket stora undertryck (vindtryckskoefficienter som är mindre än -1). På en byggnad kan detta fenomen uppträda i hörnen och längs taknocken. Man har uppmätt särskilt kraftig sug vid sned anblåsning intillnocken närmast den gavel som vetter mot vinden.

Eftersom luftströmmarna runt en byggnad är turbulenta kan vindtrycket på en viss punkt variera kraftigt över tiden. I anslutning till hörn och kanter kan det dessutom uppträda mycket stora lokala vindlaster (tryck eller sug). De värden på den yttre vindtryckskoefficienten, C_{pe} , som används för att dimensionera byggnadskonstruktionen ur hållfasthetssynpunkt är valda med hänsyn till dessa kortvariga och lokala påkänningar. För beräkning av naturlig ventilation behövs det istället vindtryckskoefficienter som svarar mot medelvärdet av vindtrycket under en längre period och över större ytor. Värden på vindtryckskoefficienter som är avsedda för hållfasthetsdimensionering bör därför inte användas för ventilationsberäkningar. Eftersom det inte finns några enkla samband som kan användas för att bestämma vindtryckskoefficienten för en viss byggnad är man hänvisad att använda

värden från olika försök. För några av de byggnadstyper som är vanlig i lantbrukssammanhang kan man finna värden i bland annat i Sachs (1972), Bruce (1975a,b), Moran (1981), Banks et. al. (1983), Mahoney (1985), Wirén (1985, 1987), Bottcher et al. (1986), Shrestha et. al. (1993). Förslag på vindtryckskoefficienter finns nedan i avsnittet "Dimensioneringsförutsättningar".

BERÄKNING AV VENTILATIONSBEHOV

Dimensionering av en anläggning för naturligt ventilation görs alltid i två steg. Först beräknar man vilket ventilationsflöde som behövs. Därefter kan man dimensionera och placera ut ventilationsöppningarna. Hur stort ventilationsflöde som behövs bestäms av vilket stallklimat man vill ha, av värme, fukt och koldioxidproduktionen i stallet och av utomhusklimatet. I detta kapitel kommer vi att gå igenom hur man beräknar det dimensionerande ventilationsflödet. Underlaget för dimensioneringen av anläggningen finns i kapitlet "Dimensionering av anläggningar för naturligt ventilation".

Även om de fysikaliska grundprinciperna är de samma så bör man använda olika dimensioneringsförutsättningarna för värmeisolerade och oisolerade stallar. För att hålla en bra djurmiljö i konventionella isolerade stallar måste klimatet kontrolleras genom att ventilation och värme regleras. Oisolerade stallar skall ge skydd mot nederbörd och vind. Temperatur och fuktighet i stallet bestäms i första hand av utomhusklimatet. Ventilationsanläggningen i ett oisolerat stall skall utformas så att man minimerar kondensproblem och föroreningar i stallluften. Sommartid vill man dessutom undvika att stalltemperaturer blir onödigt hög i förhållande till utomhustemperaturen.

Energi- och massbalans bestämmer stallklimatet

Enligt fysikens lagar kommer stalltemperaturen att ställa in sig så att det råder balans mellan den värmeenergi som tillförs i stallet (t.ex. från djur och apparater) och den energi som strömmar ut ur stallet till omgivningen. På samma sätt råder balans för fukt (vattenånga) och koldioxid. Nästan alla klimat- och ventilationsberäkningar kan föras tillbaka till dessa grundläggande balansekvationer.

Värmebalansekvationen

För värme (sensibel värme) får balansekvationen följande utseende:

$$P_{fri} + P_{till} + P_{app} = P_{trans} + P_{vent} \quad (16)$$

där

- P_{fri} = fri värmeavgivning från djur (W)
- P_{till} = tillskottsvärme (även solvärme) i stallet (W)
- P_{app} = spillvärme från installerade apparater i stallet (W)
- P_{trans} = byggnadens värmeförlust genom transmission (W)
- P_{vent} = byggnadens värmeförlust genom ventilation (W)

Denna ekvation förutsätter konstant stalltemperatur. Om vill göra beräkningar för dynamiska förlopp med varierande temperatur måste man dessutom ta hänsyn till värmelagring i byggnadskonstruktionen. Vid beräkning av dimensionerande ventilationsflöde förutsätts konstanta temperaturer och ekvation 16 kan därför användas. Ekvationen används för dimensionering av ventilationsflöde när stalltemperaturen är dimensionerande (t.ex. max-ventilation sommartid). Värmeavgivningen från djur och övriga källor diskuteras nedan i avsnittet "Värme, fukt- och koldioxidavgivning i stallet".

Transmissionsförlusten (P_{trans}) beräknas genom att summera värmeförlusterna för byggnadens alla begränsningsytor (n st) mot omgivningen:

$$P_{trans} = \sum_{j=1}^n U_j A_j (t_i - t_u) \quad (17)$$

där U = ytans U-värdet (W/m^2K)
 A = ytans area (m^2)
 t_i = temperaturen på insidan av byggnadsdelen ($^{\circ}C$)
 t_u = temperaturen på utsidan av byggnadsdelen ($^{\circ}C$)

Anvisningar för beräkning av U-värde finns i Svensk standard SS 02 42 02 (Värmeisolering - Byggnadsdelar - Beräkning av värmemotstånd). Uppgifter om värmemotstånd och värme-konduktivitet finns bl.a. i Boverkets rapport "Värmeisolering". Uteluftens temperatur antas råda på utsidan av väggar, fönster, dörrar, tak och golvet yttre randfält (0-1 meter innanför vägg). För övriga delar av golvet antas utsidans temperatur vara lika med den djupa mark-temperaturen på orten (Avén 1982, Handboken Bygg, kapitel H02:32).

Tabell 1 Antagen marktemperatur i olika temperaturzoner.

| Zon | A | B | C | D | E |
|----------------|----|----|----|----|----|
| Marktemperatur | 7° | 6° | 4° | 3° | 1° |

Ventilationsförlusten (P_{fri} , W) beräknas som:

$$P_{vent} = q \cdot c_p \cdot (t_i - t_u) \quad (18)$$

där q = ventilationsflödet (m^3/h)
 c_p = luftens specifika värmekapacitet ($Wh/m^3^{\circ}C$)
 t_i = inneluftens temperatur ($^{\circ}C$)
 t_u = inneluftens temperatur ($^{\circ}C$)

Luftens specifika värmekapacitet beror på dess temperatur och fukttinnehåll. För luft med 80% RF varierar den från 0,35 $Wh/m^3^{\circ}C$ vid 0 $^{\circ}C$ till 0,33 $Wh/m^3^{\circ}C$ vid 25 $^{\circ}C$.

Fuktbalansekvationen

Fuktbalansekvationen liknar värmebalansekvationen, men eftersom väggar, golv och tak normalt är fukttäta ingår ingen transmissionsterm:

$$F_{djur} + F_{strö} + F_{till} = F_{vent} \quad (19)$$

där F_{djur} = fuktavgivning från djur (kg H₂O/h)
 $F_{strö}$ = fuktavgivning från ströbädd (kg H₂O/h)
 F_{till} = fuktavgivning från apparater och dyl (kg H₂O/h)
 F_{vent} = fukt som transporteras bort med ventilationen (kg H₂O/h)

När den relativa fuktigheten är dimensionerande används fuktbalansekvationen för att beräkna erforderlig ventilationsflöde.

Den mängd fukt (F_{vent} , g H₂O) som transporteras bort med ventilationen beräknas med formeln:

$$F_{vent} = q \cdot \rho \cdot \left(\frac{m_{vi} \varphi_i}{100} - \frac{m_{vu} \varphi_u}{100} \right) \quad (20)$$

där q = ventilationsflöde (m³/h)
 ρ = luftens densitet (kg/m³)
 m_{vi} = inneluftens maximala vatteninnehåll vid temperaturen t_i (g H₂O/kg luft)
 φ_i = inneluftens relativa fuktighet (%)
 m_{vu} = uteluftens maximala vatteninnehåll vid temperaturen t_u (g H₂O/kg luft)
 φ_u = uteluftens relativa fuktighet (%)

Uppgifter om luftens maximala fukttinnehåll och densitet vid olika temperaturer finns t. ex. i SS 95 10 50.

Koldioxidbalansekvationen

På samma sätt som för fukt antar man att väggar, golv och tak normalt är täta. Koldioxidbalansekvationen får därför följande utseende:

$$K_{djur} + K_{strö} = K_{vent} \quad (21)$$

där K_{djur} = koldioxidavgivning från djur (kg CO₂/h)
 $K_{strö}$ = koldioxidavgivning från ströbädd (kg CO₂/h)
 K_{vent} = koldioxid som transporteras bort med ventilationen (kg CO₂/h)

När koldioxidhalten i stallluften är dimensionerande är det koldioxidbalansekvationen som skall användas för att beräkna erforderlig ventilationsflöde.

Den mängd koldioxid (K_{vent} , kg CO₂/h) som transporteras bort med ventilationen beräknas med formeln:

$$K_{vent} = q \cdot \rho \cdot (m_{ki} - m_{ku}) \quad (22)$$

där q = ventilationsflöde (m³/h)
 ρ = luftens densitet (kg/m³)
 m_{ki} = inneluftens koldioxidhalt (kg CO₂/kg luft)
 m_{ku} = uteluftens koldioxidhalt (kg CO₂/kg luft)

Oftast anges luftens koldioxidhalt i volymprocent eller ppm (Parts Per Miljon = miljondelar av volymen). Förhållandet mellan densiteterna för koldioxid och torr luft är 1,529. Enligt CIGR (1984) kan man räkna om volymsandel (ppm CO₂) till masshalt (kg CO₂/kg torr luft) med hjälp av relationen:

$$[\text{ppm CO}_2] \times 1,529 \times 10^{-6} = [\text{kg CO}_2/\text{kg luft}] \quad (23)$$

Koldioxidproduktion anges oftast som liter/h. För att räkna om detta till kg/h så måste man också ta hänsyn till temperaturen (t , °C). Vid normalt lufttryck (101,3 kPa) blir omräkningsformeln (CIGR, 1984):

$$\frac{[\text{liter CO}_2 / h] \times 539,99}{(t + 273,15)} = [\text{kg CO}_2 / h] \quad (24)$$

Ventilationsbehov i värmeisolerade stallar

Erforderlig ventilationskapacitet för värmeisolerade stallar beräknas enligt anvisningarna i Svensk standard SS 95 10 50 utgåva 2: Lantbruksbyggnader - Ventilation och klimatanalys i värmeisolerade djurstallar - Beräkningsregler. Nedanstående punkter är en kort sammanfattning av anvisningarna.

Ventilationsbehov

För naturligt ventilerade värmeisolerade stallar beräknas dimensionerande ventilationsflöde på samma sätt som för konventionella fläktventilerade stallar. Det innebär att man skall beräkna ett **vinterventilationsflöde** (minimiventilation) och ett **sommarventilationsflöde** (maximiventilation). Minimiventilationsflödet är det minsta flöde som krävs för att vintertid inte överskrida föreskriven högsta relativa fuktighet och koldioxidhalt i stallet. Detta flöde måste beräknas för att kunna kontrollera om det behövs tilläggsvärme eller andra åtgärder för att säkerställa ett acceptabelt klimat i stallet vintertid. Maximiventilationsflödet är det flöde som krävs för att sommartid inte överskrida den högsta tillåtna temperaturskillnaden (+4°C enligt Svensk standard) mellan stallluft och uteluft. Detta flöde används för att dimensionera maxkapaciteten på ventilationsanläggningens komponenter. Överdimensionering av ventilationsöppningarnas storlek medför oftast onödiga investeringskostnader. Maximiventilationsflödet skall kunna uppnås vid dimensionerande lägsta temperaturskillnad i kombination med lägsta vindhastighet (se avsnittet om dimensioneringsförutsättningar nedan).

Dimensionerande vinterklimat

Dimensionerande lägsta utetemperatur vintertid beror på var i landet stallet ligger. Den lägsta utetemperaturer för olika klimatzoner framgår av tabell 2. Enligt Svensk standard antas den relativa luftfuktigheten ute vara 90% om lufttemperaturen är lägre än -10°C, 85% om den är mellan -10°C och 0°C samt 80% för temperaturer mellan +1°C och +10°C.

Tabell 2. Dimensionerande utetemperatur vintertid för värmeisolerade stallar (enligt Svensk standard SS 95 10 50)

| Zon | A | B | C | D | E |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Temperatur | -10°C | -15°C | -18°C | -20°C | -24°C |

Ventilationsbehov i oisolerade stallar

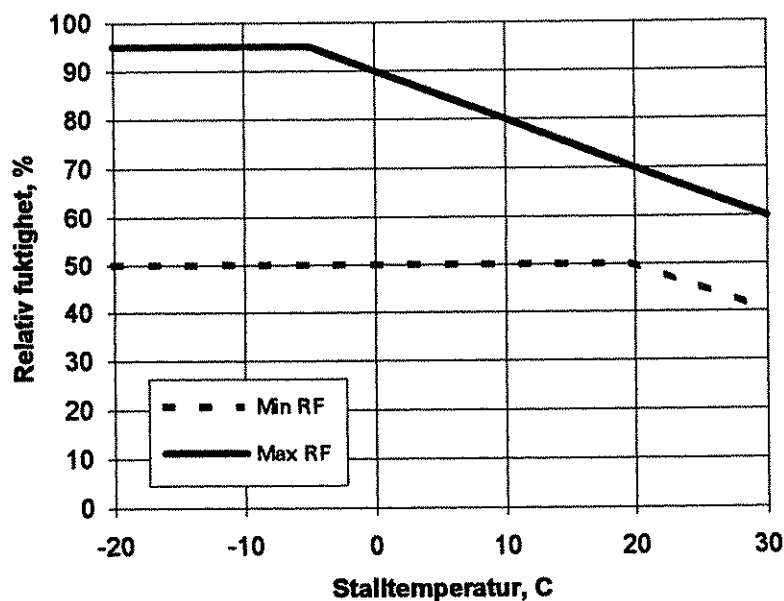
I ett oisolerat stall har man inte lika stora krav på att kontrollera inomhusklimatet, det viktigaste är att byggnaden skall ge skydd mot nederbörd och vind. I ett oisolerat stall kommer temperatur och fuktighet i första hand att bestämmas av utomhusklimatet. De kriterier som är viktiga när det gäller att dimensionera ventilationen är:

1. Halterna av föroreningar i stalluften får inte bli för höga
2. Kondensbildning medför hygieniska problem och bör därför undvikas
3. För att undvika värmestress bör övertemperaturen i stallet sommartid inte bli för stor

Eftersom det knappast är aktuellt med tilläggsvärme i oisolerade stallar behöver man inte beräkna något minimiventilationsflöde. Däremot måste man bestämma ett **lägsta godtagbara ventilationsflöde** med hänsyn till föroreningar, fukt och övertemperatur. Detta ventilationsflöde skall kunna uppnås vid dimensionerande lägsta temperaturskillnad i kombination med lägsta dimensionerande vindhastighet (se avsnittet om dimensioneringsföreskrifter nedan).

När det gäller halten av föroreningar i stalluften (kriterium 1) så skiljer sig inte oisolerade stallar från värmeisolerade. Enligt Jordbruksverkets föreskrifter (SJVFS 1993:129) får djur endast tillfällighetsvis utsättas för en koldioxidhalt som överskrider 3000 ppm. Ett minimikrav är därför att ventilationsflödet dimensioneras med hänsyn till detta gränsvärde enligt anvisningarna i Svensk standard SS 95 10 50.

Jordbruksverkets anvisningar innehåller också en föreskrift om att den relativa fuktigheten i oisolerade stallar inte annat än undantagsvis får överskrida uteluftens fuktighet med mer än 10 procentenheter (kriterium 2). Nedanstående figur (fig 6) visar CIGRs (1984) rekommendationer för den relativa luftfuktigheten i stallar.



Figur 6. Rekommenderad högsta och lägsta relativa fuktighet med hänsyn till stalltemperaturen (CIGR, 1984).

Ventilationen i konventionella värmeisolerade stallar dimensioneras så att övertemperaturen (kriterium 3) sommartid inte skall överskrida 4°C vid 21°C utomhustemperatur (Svensk standard SS 95 10 50, utgåva 2)

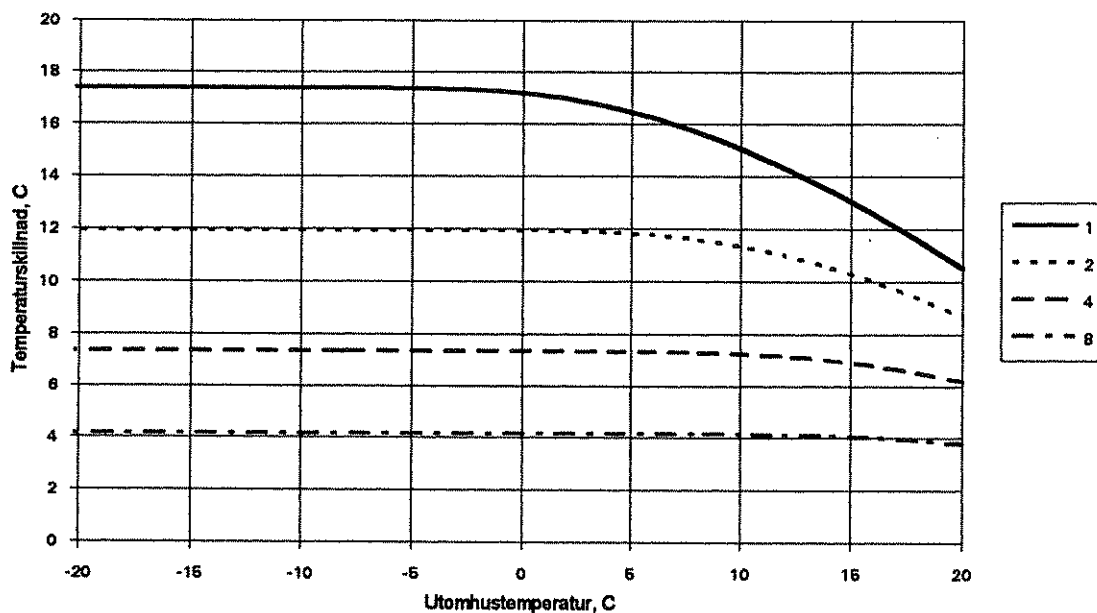
För att klargöra under vilka klimatförhållanden som det är svårast att uppfylla dessa kriterier har vi simulera klimatet i ett oisolerat stall. Klimatstatistik för olika orter i Sverige (Taesler, 1972) visar att uteluftens relativa fuktighet i huvudsak bestäms av utomhustemperaturen. De värden på uteluftens relativa fuktighet som har använts vid simuleringen baseras på ett medeltal av data för 11 orter fördelade över hela Sverige.

Tabell 3. Underlag för simulering av stallklimat i oisolerat stall. Antagen relativ fuktighet utomhus.

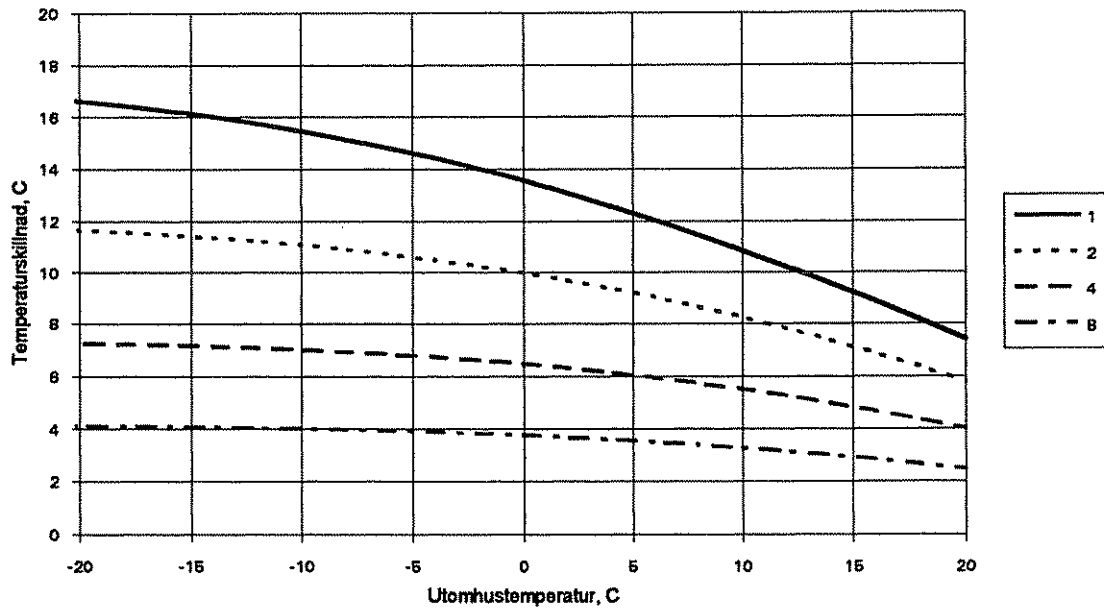
| Temperatur | RF, % | Temperatur | RF, % | Temperatur | RF, % |
|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
| -20 | 90 | -5 | 75 | +10 | 80 |
| -15 | 90 | 0 | 85 | +15 | 75 |
| -10 | 85 | +5 | 85 | +20 | 45 |

Isoleringsförmågan hos tak och väggar i den oisolerad byggnad som använts vid simuleringen har antagits motsvara en transmissionsförlust på 25 W/°C per 1000 W total värmeproduktion från djuren. Fyra olika nivåer på ventilationsflödet har använts vid simuleringen. Den lägsta nivån motsvarar det flöde som krävs för att inte överskrida gränsvärdet för koldioxid. Enligt resonemanget ovan är detta det absolut lägsta flöde som kan accepteras. Inomhusklimatet har dessutom simulerats med ventilationsflöden motsvarande 2 gånger, 4 gånger och 8 gånger detta flöde. Fördelningen mellan djur värme- och fuktproduktion

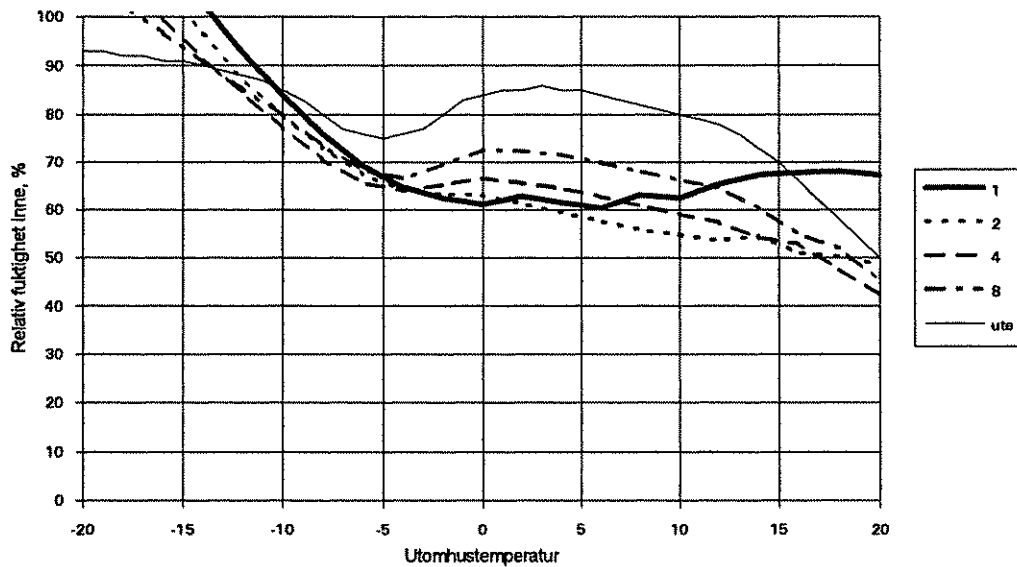
påverkas av omgivningstemperaturen och är olika för olika typer av djurslag. När värme- och fuktavgivningen beräknas enligt Svensk Standard 95 10 50 används en faktor K_t (se ekvation 25 och figur 11). Figur 7 och 9 visar resultaten för simulering med $K_t = +5$ (gäller t.ex. dräktiga suggor). Motsvarande resultat för $K_t = -40$ (gäller t.ex. lakterande mjölkkor) visas i figur 8 och 10.



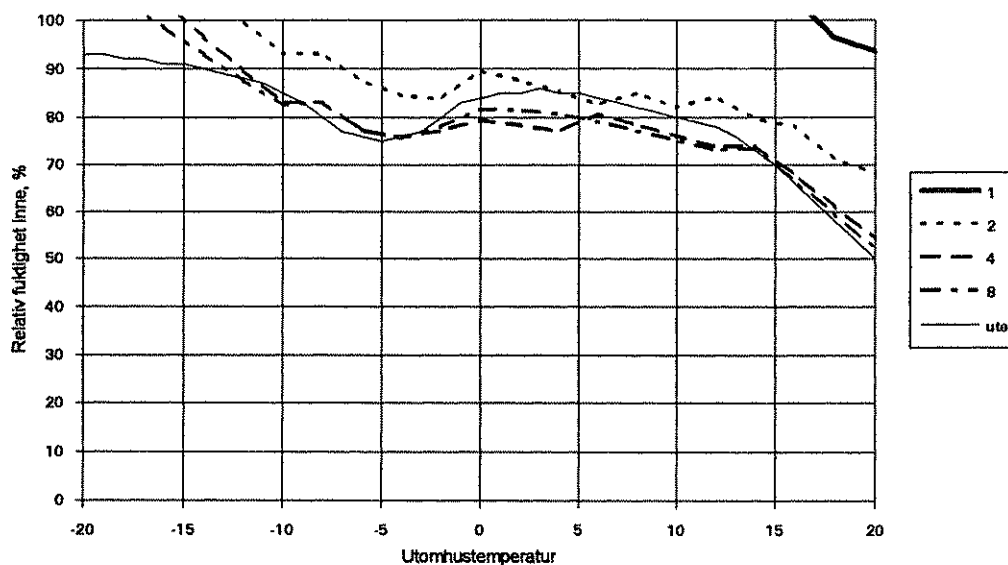
Figur 7. Simulering av stallklimat i ett oisolerat stall med sinsuggor ($K_t=5$). Temperaturskillnad mellan stallet och uteluften vid olika ventilationsflöden (1, 2, 4 och 8 gånger det flöde som krävs med hänsyn till gränsvärdet för luftens koldioxidhalt).



Figur 8. Simulering av stallklimat i ett oisolerat stall med lakterande kor ($K_t = -40$). Temperaturskillnad mellan stallet och uteluften vid olika ventilationsflöden (1, 2, 4 och 8 gånger det flöde som krävs med hänsyn till gränsvärdet för luftens koldioxidhalt).



Figur 9. Simulering av stallklimat i ett oisolerat stall med sinsuggor ($K_t = 5$). Antagen relativ luftfuktighet ute (smal heldragen linje) samt beräknad luftfuktighet i stallet vid olika ventilationsflöden (1, 2, 4 och 8 gånger det flöde som krävs med hänsyn till gränsvärdet för luftens koldioxidhalt).



Figur 10. Simulering av stallklimat i ett oisolerat stall med lakterande mjölkkor ($K_t = -40$). Antagen relativ luftfuktighet ute (smal heldragen linje) samt beräknad luftfuktighet i stallet vid olika ventilationsflöden (1, 2, 4 och 8 gånger det flöde som krävs med hänsyn till gränsvärdet för luftens koldioxidhalt).

Figur 6 visar att det i sinsuggstallet behövs ett ventilationsflöde på ca 8 gånger koldioxidventilationen för att begränsa övertemperaturen i stallet till 4° när det är 20°C ute. För de lakterande mjölkorna (figur 8) räcker det med ett flöde på 4 gånger koldioxidventilationen. Skillnaden beror på att när det är varmt, avger korna (som har mycket lägre kritisk temperatur) en större andel av sin totala värmeavgivning som fukt än sinsuggorna.

Figur 9 och 10 visar att oberoende av ventilationsflödet är omöjligt att undvika hög relativ fuktighet (kondensbildning/frost) vintertid när temperaturen är lägre än ca -15°C . Man kan också se att en ökning av ventilationsflödet över ca 4 gånger koldioxidventilationen knappast medför någon ytterligare sänkning av luftfuktigheten i stallet. Kornas höga fuktavgivning resulterar i att den relativa luftfuktigheten är högre i kostallet än i sinsuggstallet. Som väntat är skillnaden särskilt markant när det är varmt. En jämförelse mellan temperatur- och luftfuktighetsdiagrammen visar att det ventilationsflöde som krävs för att sommardag hålla övertemperaturen under $4-5^\circ\text{C}$ är tillräckligt för att under den kalla årstiden minimera fuktproblemen. Detta flöde är dessutom tillräckligt för att uppfylla kravet att luftfuktigheten inne inte bör överstiga utelufts relativa fuktighet med mer än 10%.

Lägsta godtagbara ventilationsflöde i oisolerade djurstallar

Vi föreslår att det **lägsta godtagbara ventilationsflödet** i naturligt ventilerade och oisolerade djurstallar skall beräknas så att luftens koldioxidhalt inte överskrider gränsvärdet **3000 ppm** och så att övertemperaturen i stallet inte överskrider **5°C** när utomhustemperaturen är **$+21^\circ\text{C}$** . Att man kan tillåta en högre övertemperatur i oisolerade stallar kan motiveras med de lägre kraven på klimatkontroll och svårigheten att uppnå tillräckligt ventilationsflöde vid små temperaturskillnader och svag vind. Olägenheten av den högre övertemperaturen begränsas också av att förhållanden då det både är vindstilla och varmt är ovanliga. Man bör

observera att man vid beräkningen av det lägsta godtagbara ventilationsflödet ofta måste ta hänsyn till den uppvärmning som orsakas av solinstrålningen.

Värme-, fukt och koldioxidproduktion i stallet

Djurens värme- fukt och koldioxidproduktionen i naturligt ventilerade stallar skiljer sig inte från vad som gäller för mekaniskt ventilerade stallar. I oisolerade stallar varierar innetemperaturen mer än i isolerade vilket medför en större variation i hur djurens totala värme- produktion fördelas mellan värme- och fuktavgivning. Som visats ovan kommer dock det lägsta godtagbara ventilationsflödet bestämmas av klimatförhållandena sommartid. I oisolerade stallar kan uppvärmning p.g.a. solinstrålningen samt värme- och fuktavgivningen från ströbäddar få stor betydelse för värmebelastningen i stallet.

Djur

Djurens värme-, fukt och koldioxidavgivning beräknas enligt Svensk standard (SS 95 10 50 utgåva 2). Fukt- och värmeavgivningen vid normal stalltemperatur finns tabellerad i SS 95 10 50 (utgåva 2). Vid andra temperaturer beräknas den fria värmeavgivningen från ett djur med formeln:

$$P_{fri} = P_{tot} \cdot (0.8 - a(t - K_t)^4) \quad (25)$$

där P_{fri} = fri värmeavgivning från djur (W)
 P_{tot} = total värmeavgivning (W)
 a = faktor (beräknas med formel 14)
 t = omgivningstemperatur (°C)
 K_t = faktor som beror på djurslag (enligt tabell i SS 95 10 50)

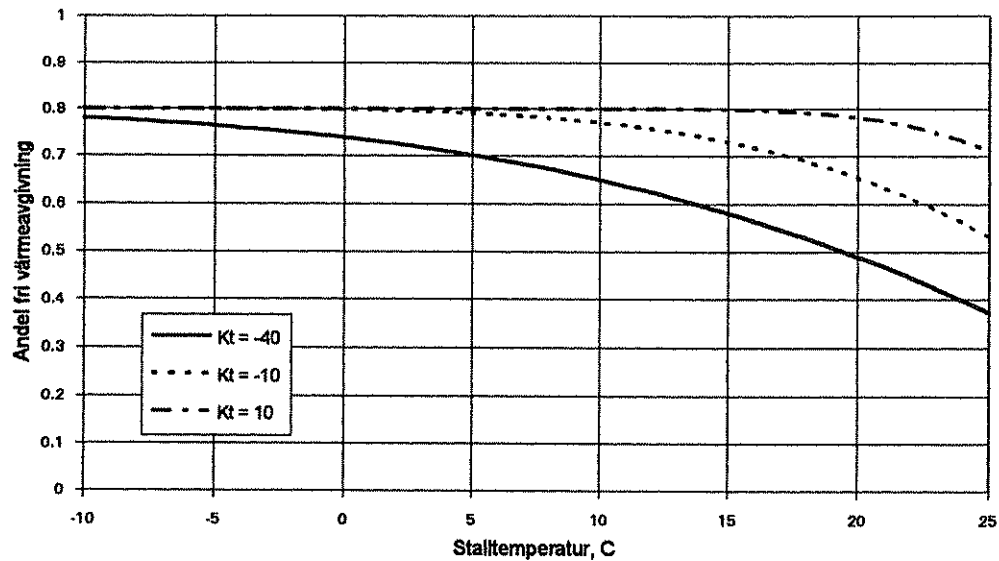
Faktorn a beräknas med formeln:

$$a = \frac{0.8}{(36 - K_t)^4} \quad (26)$$

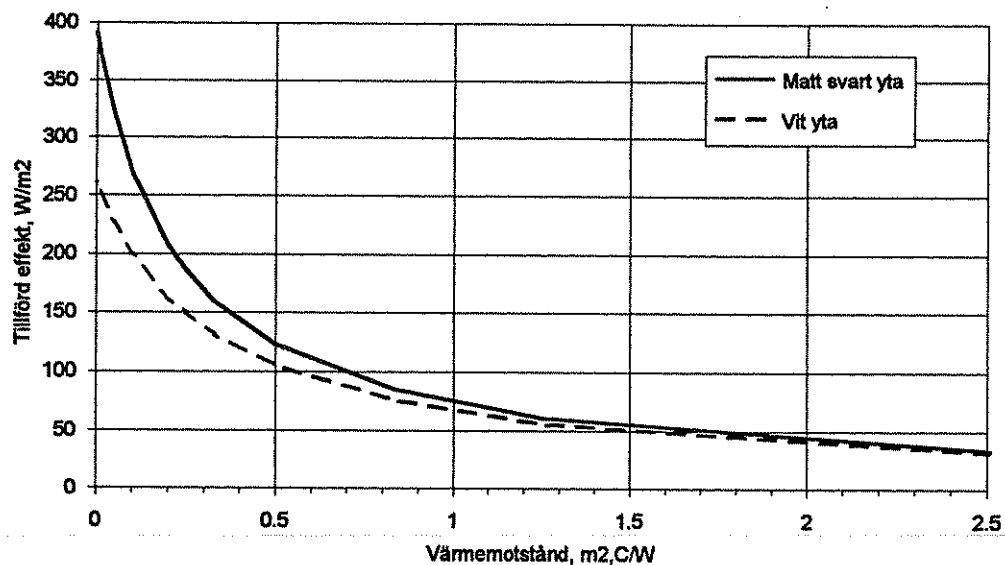
Om man inte har uppgift om K_t för ett visst djurslag så används $K_t = -10$ och $a = 1,85 \cdot 10^{-7}$. När man sedan känner både djurets total värmeproduktion (P_{tot} , W) och den fria värmeavgivningen (P_{fri} , W) kan fuktavgivningen (F , g vatten/h) beräknas med hjälp av ekvation 26.

$$F = \frac{(P_{tot} - P_{fri})}{0.68} \quad (27)$$

Faktorn K_t är låg för djur som har stor total värmeproduktion i förhållande till sin kroppsarea (t.ex. lakterande mjölkkor) och hög när den totala värmeproduktionen är liten i förhållande till kroppsarean (t.ex. spädkalvar och smågrisar). Figur 11 visar att för djur med lågt K_t kan det vara ganska stor skillnad på den fria värmeavgivningen i ett isolerat stall där stalltemperaturen är ca 12°C jämfört med när det t.ex. är -10°C en kall oisolerad byggnad.



Figur 11. Fri värmeavgivning som andel av djurets totala värmeproduktion beräknad enligt Svensk standard (SS 95 10 50 utgåva 2) för olika värden på faktorn K_t .



Figur 12 Beräknat värmetillskott (W/m^2) som tillförs en byggnad från en yta som bestrålas av solinstrålningen med en intensitet på 1000 W/m^2 . Ett värmemotstånd på $0,5 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$ kan utgöras av 2 cm mineralull och $2,5 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$ av 10 cm mineralull.

Värmetillskott orsakad av solinstrålning

Solinstrålning mot transparenta eller oisolerade tak och väggar kan orsaka en avsevärd värmebelastning i oisolerade stallar. Figur 12 visar en beräkning av hur mycket extra värme en byggnad tillförs (W/m^2 takyta) när solinstrålningen är 1000 W/m^2 (den intensitet som

uppnås en klar sommardag). I byggnader med transparent tak och/eller väggar kan värmeskottet bli ännu större.

Avgivning från ströbäddar

I oisolerade byggnader är det vanligt med ströbäddar. Komposteringsprocessen i sådana bäddar producerar fukt, värme och koldioxid. Ett pågående försök med mätning av fuktavgivning från ströbäddar har gett värden mellan 30 och 100 g fukt per m² ströbädd och timme. Värmeavgivningen från bädden var däremot obetydlig. Koldioxidavgivningen är inte uppmätt, men den står i proportion till den totala värmeproduktionen i bädden och kan uppskattas till mellan 5 och 10 liter CO₂ per kvadratmeter bädd och timme

DIMENSIONERING AV ANLÄGGNINGAR FÖR NATURLIG VENTILATION

I det föregående avsnittet har redovisats hur man beräknar ventilationsbehovet för en naturligt ventilerad byggnad. Det andra steget i projekteringen är att bestämma typ, storlek och placering av ventilationsöppningarna. Här skiljer sig principerna för naturlig ventilation fundamentalt från mekanisk ventilation. I anläggningar med mekanisk ventilation påverkar inte från- och tilluftsdonens inbördes placering anläggningens kapacitet. För anläggningar som bygger på naturlig ventilation är det tvärtom så att kapaciteten bestäms av till- och frånluftöppningarnas inbördes placering. Kapaciteten påverkas också av de yttre tryck som orsakas av vinden. Detta medför att det blir mycket mer komplicerat att dimensionera/välja och placera ut ventilationsöppningarna. I princip måste man prova sig fram med olika utformning och placering av ventilationsöppningarna till dess man hittar en lösning som ger den önskade kapaciteten.

Dimensioneringsförutsättningar

I de tidigare teoriavsnitten har redogjorts för hur skillnader i luftens densitet mellan stall och ute (skorstenseffekt) samt yttre vindtryck orsakar naturlig ventilation. När temperaturskillnaden mellan stallet och uteluften är liten kommer vinden att få avgörande betydelse för om ventilationsflödet blir tillräckligt. Sådan förhållanden råder normalt i oisolerade stallar året runt. I isolerade stallar är normalt temperaturskillnaden liten sommartid eftersom stalltemperaturen inte bör överstiga utetemperaturen med mer än 4-5°C med hänsyn till djurens termiska komfort.

Luftens densitet

Luftens densitet beror på dess temperatur och fuktinnehåll. Dessutom påverkar lufttrycket densiteten, men vid dimensionering av naturlig ventilation antar man att lufttrycket är normalt (1013 mbar = 101,3 kPa). Luftens fuktinnehåll har bara praktiskt betydelse om luften är varm och om temperaturskillnaden är liten mellan ute- och inneluft. I tabell 2 finns en tabell med värden på densiteten under de temperatur och fuktighetsförhållanden som är aktuella vid ventilationsberäkningar. För att bestämma det luftflöde som orsakas av skor-

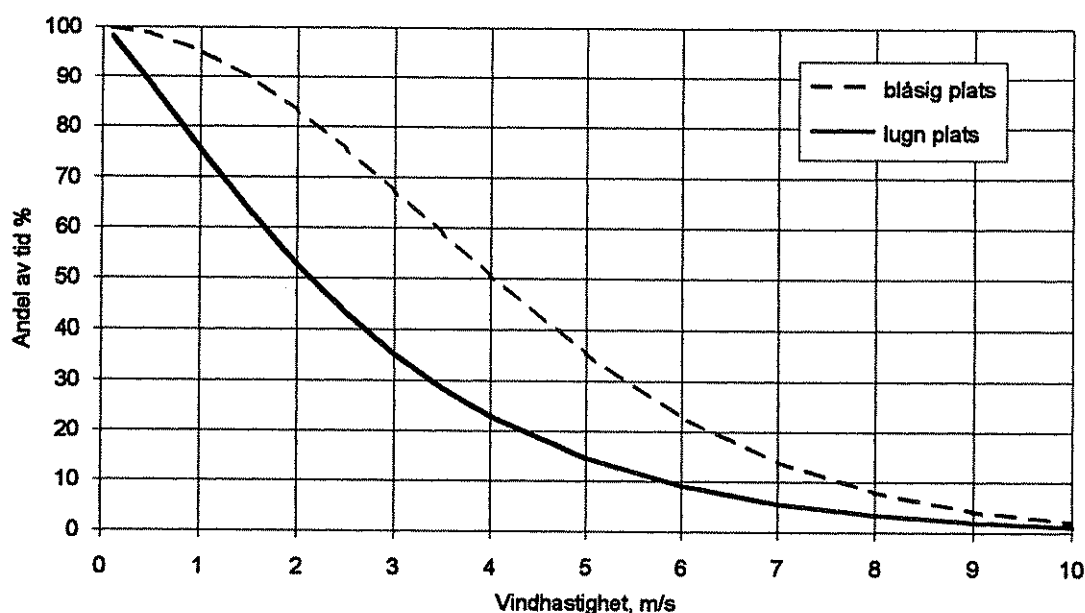
stenseffekten beräknar man inne- och utluftens densitet med hänsyn till dess dimensionerande temperatur och luftfuktighet.

Vindhastighet

Vindhastigheten ute har stor betydelse för ventilationen i naturligt ventilerade stallar. Om vinden är svagare än förväntat, riskerar man att luftutbytet i stallen blir för litet, vilket leder till högre stalltemperatur och sämre luftkvalité än avsett. Längre perioder med svaga vindar eller stiltje förekommer överallt i Sverige men är ovanliga. Vindhastighetens statistiska sannolikhetsfördelning på en ort brukar beskrivas med den s.k. Weibullsfördelningen:

$$P(\geq w) = e^{-\left(\frac{w}{A}\right)^C} \quad (28)$$

Där P är andel av året då vindhastigheten är w m/s eller högre. A och C är konstanter som används för att karakterisera den statistiska vindhastighetsfördelningen på olika platser.



Figur 13. Vindhastighetens fördelning beräknad med Weibullsekvationen för en blåsigt plats (streckad kurva, $A = 4,9$, $C = 1,9$) och en plats med svaga vindar (heldragen kurva, $A = 2,9$, $C = 1,2$).

Ekvation 28 kan formuleras om för att beräkna den vindhastighet som överskrider en viss andel (P , $0 \leq P \leq 1$) av tiden:

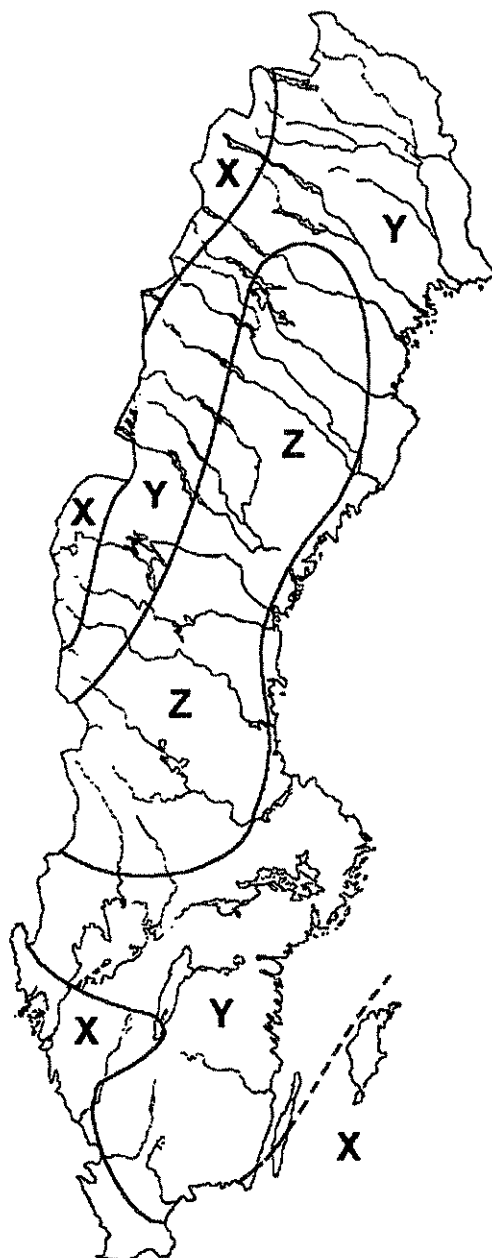
$$w = A \cdot \left[\ln\left(\frac{1}{P}\right) \right]^{\frac{1}{C}} \quad (29)$$

I "Vindatlas för Sverige" (Krieg, 1992) finns data för parametrarna A och C för ett stort antal orter. Ett urval av dessa data finns nedan i bilaga 3. Figur 13 visar den beräknade vind-

hastighetsfördelningen både för en plats där det i medeltal blåser mycket och för en plats med svaga vindar.

För att i största möjliga utsträckning undvika de problem som är förknippade med ett för litet ventilationsflöde skall den dimensionerande vindhastigheten väljas så låg att den underskrids mycket sällan. Hög utetemperatur är ytterligare ett kriterium som man måste ta hänsyn till när det gäller för det dimensionerande fallet med låga vindhastigheter. Samvariationen mellan vind och temperatur finns redovisad i Taesler (1972). När vinden understiger 1 m/s är utemperaturen över 20°C endast 1-2% av tiden beroende på vilken ort det gäller. Om man väljer den dimensionerande vindhastigheten väljs så att den överskrides under 95% av tiden så kommer ventilationsflödet att bli lägre än det dimensionerande, samtidigt som utemperaturen är över 20°C, under sammanlagt mindre än en dag under ett normalår.

Data sammanställda av Krieg (1992) har används för att dela in landet i vindzoner (figur 14) och som underlag för de dimensionerande vindhastigheterna som redovisas i tabell 4.



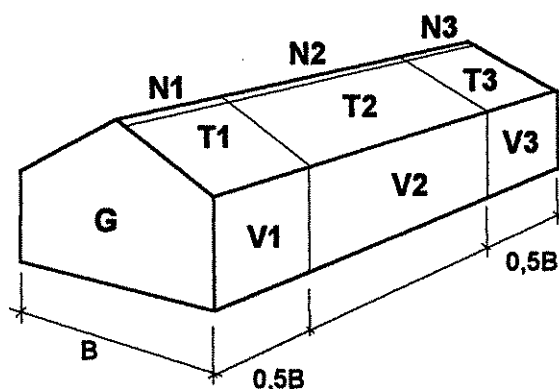
Figur 14. Vindhastighetszoner för dimensionering av vinddriven ventilation .

Tabell 4. Dimensionerande vindhastighet för beräkning av naturlig ventilation. Värdena i tabellen är valda så att de i medeltal överskrider under 95% av ett normalår.

| | Öppen slätt med enstaka byggnader eller träd | Mellanbygd med fält, skogsdungar och spridd bebyggelse | Städer eller skogslandskap med enstaka öppna fält |
|-----------|--|--|---|
| Vindzon X | 1.0 | 0.9 | 0.7 |
| Vindzon Y | 0.8 | 0.7 | 0.6 |
| Vindzon Z | 0.5 | 0.4 | 0.3 |

Vindtryckskoefficienter




För att beräkna det av vinden alstrade drivtrycket på utsidan av en byggnad behöver man kännedom om vindtryckskoefficienterna. Koefficienterna är beroende av byggnadens proportioner och takvinkel samt vindens anblåsningsvinkel. En positiv (+) koefficient innebär att vinden orsakar ett övertryck mot ytan. Ett negativt värde (-) svarar mot ett undertryck. Tabell 5 innehåller förslag på vindtryckskoefficienterna för dimensionering av naturligt ventilation. Värdena i tabellen gäller för en låg, bred och lång byggnad (ca 15° taklutning, höjd/breddförhållande ca 0,5, längd/breddförhållande ca 4).



Figur 15. Beteckningar som används i tabell 5 med vindtryckskoefficienter för olika ytor på en byggnad. Längden på ytorna V1, V2, T1 och T2 är $0,5 \times B$ (husbredden).

Mindre taklutning än 15° ger kraftigare sug på taket medan suget minskar upp till taklutningar på ca 30° (Sachs 1972). Värdena i tabell 5 gäller en byggnad med i stort sett täta väggar. I ett försök där ventilationsöppningarnas andel av väggarean varierades (Bottcher et al. (1986) minskade vindtryckskoefficienten på vindsidan när öppningsandelen ökade (från $c_{pe} = 0.55$ vid 20% öppningsarea till $c_{pe} = 0.35$ vid 75% öppningsarea). I samma experiment fann man att koefficienten på läsidan varierade från $c_{pe} = -0.55$ vid 0% öppning till $c_{pe} = -0.25$ vid 40% öppning för att sedan åter sjunka till $c_{pe} = -0.4$ vid 75% öppningsandel.

Tabell 5. Förslag på yttre vindtryckskoefficienter (c_{pe}) för en låg, bred och lång byggnad. Beteckningar på olika byggnadsytor förklaras i figur 14. Värdena bygger på en egen sammanställning av från datauppgifter i Sachs (1972), Bruce (1975), Moran (1981), Bottcher et al. (1986) samt Shresta et al. (1993)

| Vindriktning | Sida | Väggar | | | | Takyta | | | Nock | | |
|--|------|--------|------|------|------|--------|------|------|------|------|------|
| | | G | V1 | V2 | V3 | T1 | T2 | T3 | N1 | N2 | N3 |
| 90°  | Vind | -0,6 | +0,5 | +0,6 | +0,5 | -0,5 | -0,6 | -0,5 | -0,4 | -0,4 | -0,4 |
| | Lä | -0,6 | -0,3 | -0,4 | -0,3 | -0,5 | -0,5 | -0,5 | | | |
| 45°  | Vind | +0,2 | +0,4 | +0,3 | +0,1 | -0,4 | -0,4 | -0,3 | -1,0 | -0,6 | -0,4 |
| | Lä | -0,5 | -0,5 | -0,4 | -0,3 | -0,5 | -0,5 | -0,4 | | | |
| 0°  | Vind | +0,6 | -0,3 | -0,2 | -0,1 | -0,6 | -0,1 | -0,1 | -0,6 | -0,1 | -0,1 |
| | Lä | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,1 | -0,6 | -0,1 | -0,1 | | | |

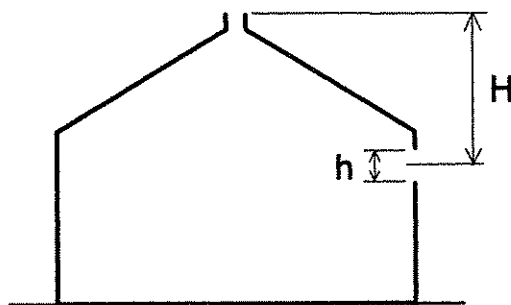
Dimensionering med hänsyn till skorstenseffekt

Som tidigare beskrivits orsakas skorstenseffekten av skillnader i densitet mellan inne- och uteluft. Under sommarförhållanden med liten temperaturskillnad mellan inne och uteluft är skorstenseffekten svag (ca 1 Pa) i förhållande till de tryckskillnader som orsakas av vinden. I det enklaste fallet, med bara har en typ av tilluftsöppningar i väggen samt en springa eller trumma i taket, är det relativt lätt att beräkna det ventilationsflöde som orsakas av skorstenseffekten. Om det gäller en byggnad med många olika öppningar på olika höjd så bör en dator användas för att beräkna ventilationsflödet.

Förenklad metod

Den här beskrivna metoden kan användas för att dimensionera ventilationsöppningarna när alla tilluftsöppningar ligger på en nivå och alla frånluftsöppningar på en annan. Alla tilluftsöppningar respektive frånluftsöppningar skall ha samma förlustkoefficient. Höjdskillnaden (H , m) bestäms som avståndet mellan mitten på tilluftsöppningarna och frånluftsöppningens utlopp. Vidare förutsätts att ventilationsöppningarna i väggarna är "smala", dvs att öppningens höjd bör vara mindre än 1/10 av höjdskillnaden mellan till- och frånluftsdonen.

Metoden bygger på att man först beräknar det tillgängliga drivtrycket (Δp , Pa). Därefter bestämmer man hur stor del av drivtrycket som skall användas för att övervinna strömningsförlusterna i tilluftsöppningarna och hur stor del som återstår till förlusterna i frånluftsöppningarna. Slutligen kan erforderlig öppningsarea beräknas med hänsyn till tillgängligt drivtryck och öppningarnas förlustkoefficient.



Figur 16 Höjdskillnad (H) mellan till- och frånluftsöppningar. Höjden mäts från mitten på öppningen under förutsättning att öppningen är "smal", dvs höjden h är mindre än $1/10$ av H .

Lufthastigheten i öppningen (w , m/s) beror på ventilationsflödet (q , m³/s) och öppningens area (A , m²).

$$w = \frac{q}{A} \quad (30)$$

Den öppningsarea som behövs för ett visst flöde kan beräknas genom att kombinera ekvation 12 och 30

$$A = q \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot \zeta}{2 \cdot \Delta p}} \quad (31)$$

STEG 1

Det totala drivtryck (p_d , Pa) som beror på densitetsskillnader beräknas:

$$p_d = (\rho_u - \rho_i) \cdot g \cdot H \quad (32)$$

där ρ_u = utluftens densitet [kg/m³]
 ρ_i = inluftens densitet [kg/m³]
 g = 9.81 m/s²
 H = höjdskillnad mellan till- och frånluftsöppning [m]

Skillnaden mellan ute- och inluftens densitet beror i första hand på temperaturskillnaden, men även skillnader i luftens fukttinnehåll kan få betydelse om temperaturskillnaden är liten. Uppgift om luftens densitet kan antingen hämtas från tabellen i bilaga 2 eller beräknas med hjälp av ekvationerna 4-6.

STEG 2

Bestäm hur det totala drivtrycket (p_d , Pa) skall fördelas mellan tryckförlusten i tilluftsöppningarna (Δp_{till} , Pa) och frånluftsöppningarna ($\Delta p_{från}$, Pa). Normalt är det lämpligt att låta 30-50% av det totala drivtrycket förbrukas i tilluftsöppningarna.

$$p_d = \Delta p_{till} + \Delta p_{från} \quad (33)$$

STEG 3

Slutligen beräknas erforderlig area med hjälp av ekvation 31. Exempel på förlustkoefficient (ζ) för olika typer av ventilationsöppningar finns sammanställt i bilaga 1. Observera att de förlustkoefficient som anges i tabellen för glespanel och vindsyddsväv gäller **per kvadratmeter vägg eller väv**. Man behöver därför inte hålla reda på hur stor arean är på springorna eller hålen.

Exempel på förenklad beräknad beräkning av skorstenseffekt

I en byggnad finns ventilationsöppningar på långsidorna och inocken. Höjdskillnaden mellan öppningarna är 5 meter. Ventilationsöppningarna på väggarna utgörs av glespanel med ett förlustkoefficient $\zeta = 127$ och en nockspringa med förlustkoefficient $\zeta = 2,1$.

Ventilationsbehovet antas vara $12000 \text{ m}^3/\text{h} = 3,33 \text{ m}^3/\text{s}$.

Inneluftens densitet är $1,177 \text{ kg/m}^3$ ($+25^\circ\text{C}$, 60% RF) och uteluftens $1,197$ ($+20^\circ\text{C}$, 40% RF).

Med dessa förutsättningar blir drivtrycket (ekvation 32):

$$p_d = (1,197 - 1,177) \cdot 9,81 \cdot 5 = 0,981 \text{ Pa}$$

Vi fördelar drivtrycket lika (50% vardera) mellan till- och frånluftsöppningar.

Ventilationsöppningarnas areor kan nu beräknas (ekvation 31):

$$A_{vägg} = 3,33 \cdot \sqrt{\frac{1,197 \cdot 127}{2 \cdot 0,981 \cdot 0,5}} = 41 \text{ m}^2$$

$$A_{nock} = 3,33 \cdot \sqrt{\frac{1,177 \cdot 2,1}{2 \cdot 0,981 \cdot 0,5}} = 7,6 \text{ m}^2$$

Faktorn 0,5 beror på att det totala drivtrycket fördelats lika mellan på vägg och nock-öppningar.

Generell metod

Om det finns många ventilationsöppningar på olika nivåer blir beräkningarna mer komplicerade. Bruce (1978) använder höjden för det neutrala planet (\bar{h} , m) för att beräkna drivtrycket (Δp , Pa) för en ventilationsöppning som sitter på höjden (h , m):

$$\Delta p = (\rho_u - \rho_i) \cdot g \cdot (\bar{h} - h) \quad (34)$$

Höjden på det neutrala planet bestämmer man genom att lösa ekvationen:

$$\int_A \frac{|\bar{h} - h|^3}{\bar{h} - h} dA = 0 \quad (35)$$

Metoden kan tillämpas på alla kombinationer och placeringar av öppningar, men ekvation 35 är härledd med förutsättningen att förlustkoefficienten för alla öppningarna är lika. Den metod som presenteras nedan för kombinationen av skorstenseffekt och vind har inte denna begränsning.

Flöde orsakat av vindpåverkan

Det finns ingen bra förenklad metod för att beräkna det ventilationsflöde som orsakas av vinden. På samma sätt som för skorstenseffekten så bestäms flödet genom en ventilationsöppning av drivtrycket (tryckskillnaden över öppningen). Detta drivtryck kan beräknas med kännedom om vindhastigheten samt den inre och yttre tryckkoefficienten (ekvation 11). Som tidigare nämnts kan de yttre koefficienterna för de olika öppningarna bestämmas genom provning. Svårigheten är att bestämma den inre tryckkoefficienten. Den är lika för alla öppningar i ett rum. Den beror inte bara av tryckförhållandena kring byggnaden utan också av de tryckfall som uppstår när luften strömmar genom ventilationsöppningarna. Den inre koefficientens storlek påverkas därför av ventilationsöppningarnas förlustkoefficienter, deras area och placering. För en viss byggnad med en given uppsättning ventilationsöppningar kan den inre tryckkoefficienten bestämmas genom passningsräkning.

Beräkningsgången blir:

STEG 1

Bestäm vilka yttre tryckkoefficienter (C_{pe}) som skall användas för byggnadens olika ytor med hänsyn till vindriktningen. Placera ut och bestäm ventilationsöppningarnas storlek (A_n , m²). Bestäm den dimensionerande vindhastigheten (w_{10} , m/s).

STEG 2

Beräkna den inre tryckkoefficienten, C_{pi} , med hjälp av passningsräkning. Givet ett visst värde på C_{pi} kan lufthastigheten (w_n , m/s) i den n:te öppningen beräknas med ekvation 14. Man får prova med olika värden på C_{pi} till dess att summan av flödena genom de olika öppningarna är noll:

$$\sum_{j=1}^n A_j w_j = 0 \quad (36)$$

STEG 3

Lägg ihop flödet genom alla öppningar där luften strömmar ut ur byggnaden. Om denna summa är mindre än ventilationsbehovet måste öppningarna göras större. Det enklaste är att

öka arean på alla öppningar proportionellt. Om förhållandet mellan de olika öppningarnas areor ändras så måste man börja om med steg 2.

Exempel

I en byggnad finns ventilationsöppningar på långsidorna och inocken. De yttre tryckkoefficienterna antas vara (C_{pe}) +0,4 respektive -0,4 för långsidorna och -0,6 för nocken. Som dimensionerande vindhastighet (med hänsyn till plats och terräng) har valts $w_{10} = 0,7$ m/s. Ventilationsöppningarna på väggarna utgörs av 40 m² glespanel (per långsida) med ett förlustkoefficient $\zeta = 127$. Nockspringans area är 6 m² och dess förlustkoefficient $\zeta = 2,1$.

Ventilationsbehovet är 12000 m³/h

Flödet genom de olika öppningarna blir:

$$\text{långsida, vind} \quad q_1 = 40 \cdot 0,7 \cdot \frac{(0,4 - C_{pi})}{\sqrt{127 \cdot |0,4 - C_{pi}|}}$$

$$\text{långsida, lä} \quad q_2 = 40 \cdot 0,7 \cdot \frac{(-0,4 - C_{pi})}{\sqrt{127 \cdot |-0,4 - C_{pi}|}}$$

$$\text{nock} \quad q_3 = 6 \cdot 0,7 \cdot \frac{(-0,6 - C_{pi})}{\sqrt{2,1 \cdot |-0,6 - C_{pi}|}}$$

Tänk på att $|x|$ betyder absolutbeloppet av x , dvs om $x=6$ så är absolutbeloppet 6 och om $x=-6$ så är absolutbeloppet också 6.

Bestäm nu C_{pi} genom prova med olika värden i ovanstående ekvationer till dess att summan av flödena blir så nära noll som möjligt:

| Antagen inre tryckkoefficient C_{pi} | Öppningar i vägg 1 q_1 (m ³ /s) | Öppningar i vägg 2 q_2 (m ³ /s) | Nockspringa q_3 (m ³ /s) | Skillnad mellan ut- och inflöden (m ³) |
|---|---|---|--|---|
| 0,30 | 0,786 | -2,079 | -2,750 | -4,042 |
| 0 | 1,571 | -1,571 | -2,245 | -2,245 |
| -0,30 | 2,079 | -0,786 | -1,587 | -0,294 |
| -0,32 | 2,108 | -0,703 | -1,534 | -0,128 |
| -0,33 | 2,123 | -0,657 | -1,506 | -0,041 |
| -0,34 | 2,137 | -0,609 | -1,478 | 0,051 |

I båda de sista alternativen är skillnaden mellan ut- och inflöde nära noll. Med hänsyn till att $|-0,041|$ är något mindre än $|-0,051|$ sätter vi den inre tryckkoefficienten till -0,33 och ventilationsflödet blir då 2,137 m³/s (≈ 7700 m³/h).

Eftersom ventilationsbehovet var 12000 m³/h så måste öppningarnas storlek ökas proportionellt:

$$\frac{12000}{7700} = 1,56$$

Det betyder att det i det här fallet behövs $1,56 \times 40 = 62$ m² glespanel i väggarna och ennocköppning på $1,56 \times 6 = 9,4$ m².

Man skall också kontrollera att öppningsareorna är tillräckliga även för de vindtryckskoefficienter som gäller för andra anblåsningsriktningar (vindriktningar).

Kombinerad skorstenseffekt och vindpåverkan

Sambandet mellan flöde och tryckskillnaden inte är linjärt (se ekvation 12). Det flöde som blir resultatet av samtidig påverkan av vind och skorstenseffekt kan därför beräknas genom att summera de delflöden som beräknats för faktorerna var för sig.

Förenklade metoder

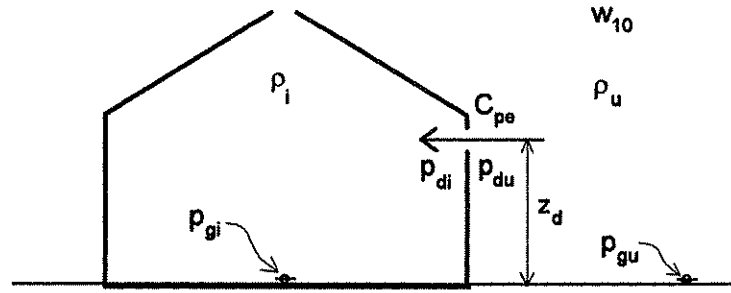
Albright (1990) föreslår att om man känner de respektive flöden som orsakas av skorstenseffekt (q_s , m³/h) och vind (q_v , m³/h), så man kan uppskatta den sammanlagda flödet (q , m³/h) med den empiriska formeln:

$$q = \sqrt{q_s^2 + q_v^2} \quad (37)$$

Enligt Albright ger formeln osäkra resultat om flödena är ungefär lika stora eller om det neutrala planet faller mitt i en öppning.

Generell metod

Strömningshastigheten genom en ventilationsöppning bestäms av den statiska tryckskillnaden mellan öppningens utsida och insida. I en byggnad med naturlig ventilation är detta tryck summan av de tryckskillnader som orsakas av skorstenseffekten och vindens tryck. Som tidigare visats brukar skorstenseffekten beräknas med utgångspunkt från höjdskillnaden mellan det neutrala planet och den aktuella ventilationsöppningen. När det gäller vind-driven ventilation använder man istället en inre tryckkoefficient. I det kombinerade fallet är det lämpligt att använda tryckskillnaden mellan lufttrycket vid golvnivån inne och ute som referens vid beräkning av drivtrycken över ventilationsöppningarna (Wirén 1985, 1993).



Figur 17 Lufttrycket på insidan (p_{di} , Pa) och utsidan (p_{du} , Pa) av ett ventilationsdon (ventilationsöppning) beror på det atmosfäriska lufttrycket vid golvnivån ute och inne (p_{gu} resp. p_{gi} , Pa), luftens densitet ute och inne (ρ_u resp. ρ_i , kg/m³), donets höjde över golvnivån (z_d , m), vindhastigheten (w_{10} , m/s) och den yttre vindtryckskoefficienten (C_{pe}).

Lufttrycket vid golvnivån inne (p_{gi} , Pa) bestäms i förhållande till atmosfärstrycket ute (p_{gu} , Pa) med hjälp av differenstrycket (p_{diff} , Pa):

$$p_{gi} = p_{gu} + p_{diff} \quad (38)$$

Luftfästigheterna inne i en byggnad så små att tryckförändringar som beror på kompression/expansion eller friktionsförluster är försumbara. Trycket på insidan av en ventilationsöppning (p_{di} , Pa) beror därför bara på lufttrycket (p_{gi} , Pa) vid golvnivån ($z=0$), inneluftens densitet (ρ_i , kg/m³) och höjden över golvet (z_d , m).

$$p_{di} = p_{gi} - z_d \cdot \rho_i \cdot g \quad (39)$$

Trycket på utsidan av öppningen eller donet (p_{du} , Pa) beror på motsvarande sätt på det atmosfäriska lufttrycket ute (p_{gu} , Pa) vid en höjd motsvarande golvnivån inne ($z=0$), uteluftens densitet (ρ_u , kg/m³) samt öppningens höjd över golvet (z_d , m). Dessutom tillkommer det statiska tryck som beror på vindhastigheten (w_{10} , m/s) och som beräknas med hänsyn till den yttre vindtryckskoefficienten (C_{pe}). Formeln blir:

$$p_{du} = p_{gu} - z_d \cdot \rho_u \cdot g + \frac{C_{pe} \cdot \rho_u \cdot w_{10}^2}{2} \quad (40)$$

Drivtrycket (Δp , Pa) över en ventilationsöppning på höjden z (m) över golvet kan nu beräknas genom att kombinera ekvationerna 38, 39 och 40:

$$\Delta p = p_{du} - p_{di} = -p_{diff} + z \cdot g \cdot (\rho_i - \rho_u) + \frac{C_{pe} \cdot \rho_u \cdot w_{10}^2}{2} \quad (41)$$

Om $\Delta p > 0$ strömmar luft in i byggnaden genom öppningen och om $\Delta p < 0$ strömmar luften ut. Med kännedom om drivtrycket i den n:te öppningen (Δp_n , Pa) och förlustkoefficienten (ζ_n) kan luftfästigheten (w_n , m/s) genom öppningen beräknas genom att utnyttja ekvation 11:

$$w_n = \Delta p_n \sqrt{\frac{2}{\rho_u \cdot \zeta_n \cdot |\Delta p_n|}} \quad (42)$$

Problemet är att vi inte känner differenstrycket (p_{diff}) i ekvation 41. På samma sätt som för ventilation orsakad av enbart vind skall summan av alla ut- och inflöden vara noll (ekvation 36). Därför kan differenstrycket relativt enkelt bestämmas genom passningsräkning på samma sätt som man gör för att beräkna den inre vindtryckskoefficienten (se avsnittet ovan om ventilation orsakad av vind).

För stora öppningar eller luftgenomsläppliga ytor som t. ex. hela väggar av glespanel eller portar kommer tryckskillnaderna och därmed flödet att vara olika på olika ställen. Det kan till och med bli så att luften strömmar in på en nivå och ut på en annan. I fallet med enbart skorstenseffekt har Bruce (1978) visat hur man kan lösa detta problem genom att anta att kontraktionskoefficienten (se avsnittet "Förlustkoefficient och kontraktionskoefficient" i kapitlet om den teoretiska bakgrunden) är lika alla öppningar och tilluftsytor. Denna approximation gör det möjligt att ställa upp en integralekvation som kan lösas analytiskt.

Ett annat beräkningsalternativ är att arbeta med mindre delytor för vilka höjden och vindtryckskoefficienten kan antas vara konstanta. Dessa delytor kan sedan i det fortsatta beräkningsarbetet behandlas som separata öppningar. Som riktvärde bör man dela upp öppningar vars höjd är större än 1/10 av avståndet från golv till taknock. Man måste också ta hänsyn till hur vindtryckskoefficienten varierar över olika delar av byggnaden (jfr figur 15 och tabell 5). Höjd koordinaten för en delyta skall räknas från mitten av delytan ner till golvnivån (den valda referensnivån).

För det generella fallet med både skorstenseffekt och vind blir beräkningsgången:

STEG 1

Bestäm ute- och inneluftens densitet med hänsyn till temperatur och luftfuktighet (till exempel med hjälp av uppgifterna i bilaga 2)

Bestäm vilka yttre tryckkoefficienter (C_{pe}) som skall användas för byggnadens olika ytor med hänsyn till vindriktningen (se figur 15 och tabell 5).

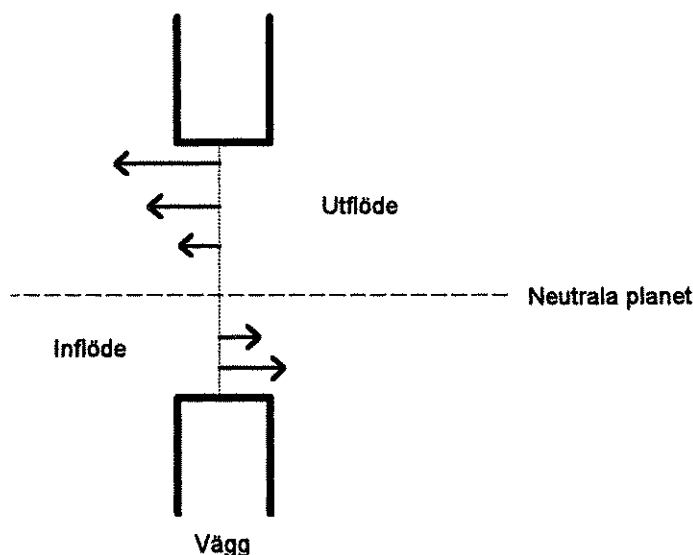
Välj typ, area och placera ut ventilationsöppningarna. Förlustkoefficienter (ζ) för olika typer av öppningar finns i bilaga 1. Välj dimensionerande vindhastighet (w_{10} , m/s) med hänsyn till orten och byggnadens placering i landskapet (se tabell 4 och figur 14).

STEG 2

Bestäm det inre differenstrycket (p_{diff}) med hjälp av passningsräkning. Lufthastigheten (w_j , m/s) i den j :te öppningen beräknas med ekvation 41 och 42. Man provar med olika värden på p_{diff} till dess att summan av flödena genom de olika öppningarna blir noll (ekvation 36)

STEG 3

Bestäm ventilationsflödet genom att summera flödena genom alla öppningar där luften strömmar ut ur byggnaden. Om denna summa är mindre än ventilationsbehovet måste öppningarna göras större. Det enklaste är att öka ventilationsarean på alla byggnadsytor proportionellt lika mycket. Om förhållandet mellan de olika byggnadsytornas areor eller öppningarnas höjd över golvet ändras så måste man börja om med steg 2.



Figur 18 Om det neutrala planet faller mitt i en ventilationsöppning så kommer den att samtidigt fungera både som till- och frånluftsdon.

Observera att om det neutrala planet hamnar i en öppning (figur 18) så kommer denna öppning att samtidigt fungera både som till- och frånluftsöppning. Samma sak kan inträffa för en mindre delyta. Om höjdkoordinaten mäts till delytans mitt så blir nettoflödet riktigt vilket gör att bestämningen av det inre differensstrycket (enligt steg 2 ovan) inte påverkas av detta fenomen. Däremot kan det bli fel vid beräkningen av luftomsättningen i byggnaden. Ligger det neutrala planet t.ex. mitt i öppningen blir nettoflödet noll, men ändå kan en avsevärd mängd uteluft strömmat in i byggnaden samtidigt som en motsvarande mängd strömmat ut. Genom att det inre trycket, densitetsskillnader och yttre vindtryck samverkar kommer det neutrala planet att ligga på olika nivåer i olika delar av byggnaden. Det gör det svårt att förutsäga när man kan förvänta sig problem med att det neutrala planet hamnar mitt i en öppning eller delyta. Risken för att detta fenomen skall störa beräkningarna kan minskas genom att använda många små delytor. Säkrast är dock att kolla tryckskillnaden vid nederkant och överkant för varje delyta för sig när ventilationsflödet skall beräknas (steg 3 ovan).

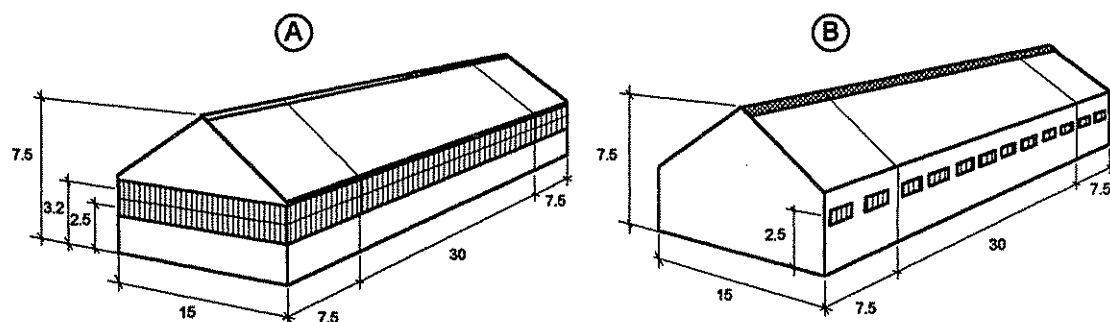
Den här beskrivna metoden är generell och kan också användas i fallen med enbart skorstenseffekt eller vind. Metoden är inte mer komplicerad än den vanligaste metoden (inre tryckkoefficient) för vinddriven ventilation och passar också bra för beräkningar som bygger på skorstenseffekten när man har många och eller stora tilluftsöppningar.

Ett beräkningsexempel

För att visa den relativa betydelsen av skorstenseffekten och vind har ventilationsflödet beräknats för två olika byggnader under olika temperatur och vindförhållanden. Figur 19 visar de två byggnadernas huvudmått och placeringen av ventilationsöppningarna. Byggnaderna har samma storlek och form, men byggnad A är utformad för vindventilation medan byggnad B i första hand är skall utnyttja skorstenseffekten.

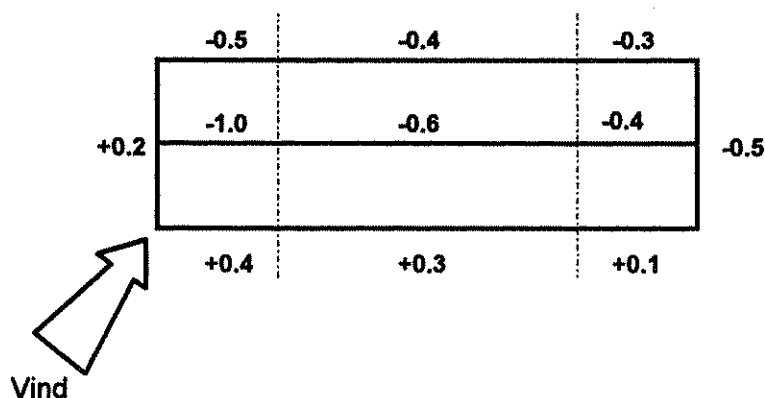
I byggnad A finns ett kontinuerligt band med glespanel (120 mm breda brädor med 10 mm springa) runt alla väggar och en relativt smal nockspringa. Byggnad B har stora konven-

tionella luftintag i långväggarna och en bred nocköppning. Öppningarnas areor, placering samt antagna förlustkoefficienter framgår av tabell 6. Figur 20 visar vilka vindtrycks-koefficienter som använts vid beräkningarna.



Figur 19 Huvudmått (meter) samt ventilationsöppningarnas placering i de byggnader som använts i beräkningsexemplet. Byggnad A är i första hand utformad med tanke på vindventilation och byggnad B med hänsyn till skorstenseffekten.

I beräkningarna har utomhusluftens temperatur antagits vara 20°C ($\rho=1.200 \text{ kg/m}^3$) medan inomhustemperaturen har varierats mellan 20°C och 30°C ($\rho=1.200 - 1.158 \text{ kg/m}^3$). Vindhastigheten har varierats från 0 till 2.0 m/s.

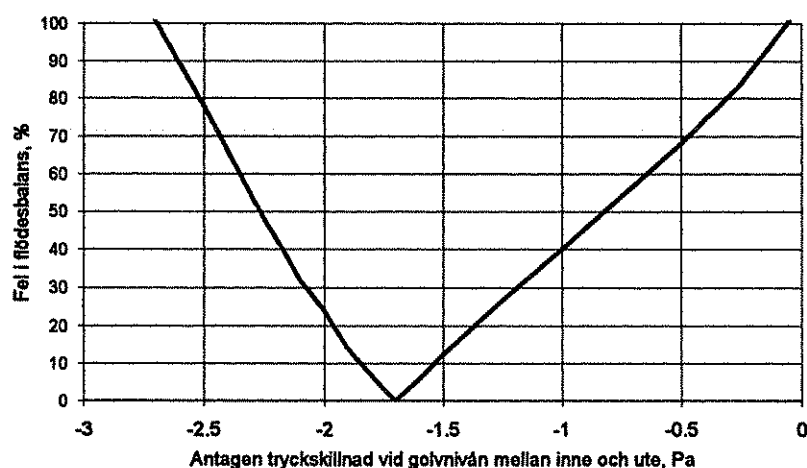


Figur 20 Antagna yttre vindtryckskoefficienter för byggnaderna i beräkningsexemplet. Värden längs centrumlinjen avser förhållandena i nockspringan.

Tabell 6 Höjd, storlek, förlustkoefficient och vindtryckskoefficienter för ventilationsöppningarna i de två byggnader som används i beräkningsexemplet.

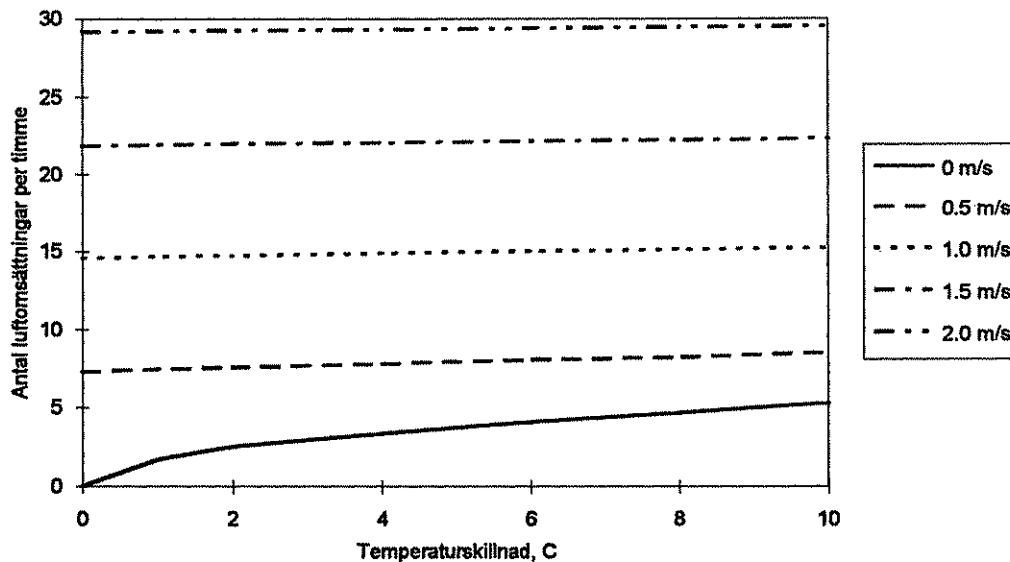
| Öppningens placering | Byggnad A | | | | Byggnad B | | | |
|----------------------|-----------|---------------------|------------|---------|-----------|---------------------|------------|---------|
| | Höjd m | Area m ² | Vind-koeff | ζ | Höjd m | Area m ² | Vind-koeff | ζ |
| Nock | 7.5 | 1 | -1.0 | 2.5 | 7.5 | 1.5 | -1.0 | 2.1 |
| | 7.5 | 2 | -0.6 | 2.5 | 7.5 | 3.0 | -0.6 | 2.1 |
| | 7.5 | 1 | -0.4 | 2.5 | 7.5 | 1.5 | -0.4 | 2.1 |
| Långvägg, vindsida | 2.5 | 7 | +0.4 | 200 | 2.5 | 0.75 | 0.4 | 0.9 |
| | 3.2 | 7 | +0.4 | 200 | | | | |
| | 2.5 | 26 | +0.3 | 200 | 2.5 | 3.0 | 0.3 | 0.9 |
| | 3.2 | 26 | +0.3 | 200 | | | | |
| | 2.5 | 7 | +0.1 | 200 | 2.5 | 0.75 | 0.1 | 0.9 |
| | 3.2 | 7 | +0.1 | 200 | | | | |
| | 2.5 | 7 | -0.5 | 200 | 2.5 | 0.75 | -0.5 | 0.9 |
| Långvägg, läsida | 3.2 | 7 | -0.5 | 200 | | | | |
| | 2.5 | 26 | -0.4 | 200 | 2.5 | 3.0 | -0.4 | 0.9 |
| | 3.2 | 26 | -0.4 | 200 | | | | |
| | 2.5 | 7 | -0.3 | 200 | 2.5 | 0.75 | -0.3 | 0.9 |
| | 3.2 | 7 | -0.3 | 200 | | | | |
| | 2.5 | 10 | +0.2 | 200 | | | | |
| | 3.2 | 10 | +0.2 | 200 | | | | |
| Gavel, vindsida | 2.5 | 10 | -0.5 | 200 | | | | |
| | 3.2 | 10 | -0.5 | 200 | | | | |

Som det beskrivits ovan bestämmer man ventilationsflödet genom prova med olika antagna värden på lufttrycket vid golvnivån inne till dess man finner ett värde som gör att summan av inflödena är lika stora som utflödena (ekvation 36). Figur 21 visar hur även små avvikelser i det antagna lufttrycket ger kraftig obalans mellan det beräknade in- och utflödet.



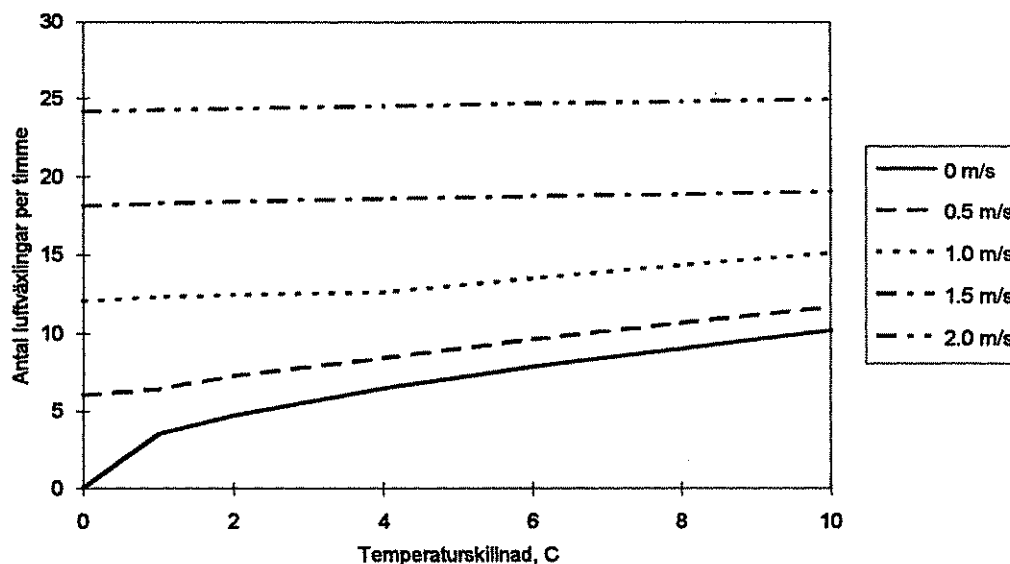
Figur 21 Förhållandet mellan absoluta felet i flödesbalans mellan in- och utlopp i relation till den antagna skillnaden mellan lyfttryck vid golvnivån inne och ute.

Figur 22 and 23 visar resultatet av beräkningarna för de två byggnaderna. I byggnad A (utformad för vindventilation) är skorstenseffekten av mycket liten betydelse redan vid så låga vindhastigheter som 0,5 m/s. Som väntat är förhållandet mellan vindhastighet och ventilationsflöde i stort sett linjärt.



Figur 22 Beräknad luftomsättning för byggnad A (enligt figur 19) vid olika vindhastigheter och i relation till temperaturskillnaden mellan byggnaden och omgivningen.

I byggnad B (utformad med tanke på skorstenseffekten) har temperaturskillnaden större betydelse för ventilationsflödet än i byggnad A. Vindens inflytande är mindre, men redan vid en så låg hastighet som 1.5 m/s dominerar ändå vindeffekten.



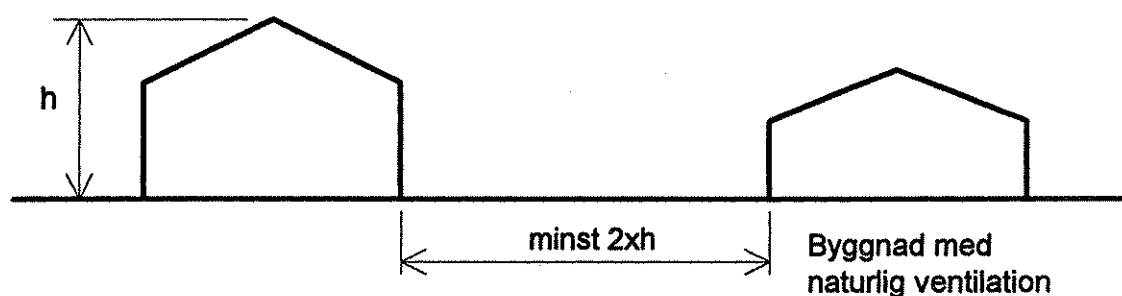
Figur 23 Beräknad luftomsättning för byggnad B (enligt figur 19) vid olika vindhastigheter och i relation till temperaturskillnaden mellan byggnaden och omgivningen.

PRAKTISKA SYNPUNKTER PÅ UTFORMNING AV NATURLIG VENTILATION

I byggnader med naturlig ventilation kan byggnadens form liksom orientering i förhållande till förhärskande vindriktning ha stor betydelse för anläggningens funktion. Andra viktiga faktorer är placeringen i förhållande till andra byggnader och olika hinder i terrängen. Även när det gäller principerna för ventilationsöppningarnas placering och utformning skiljer sig naturlig ventilation från mekanisk ventilation. En fullständig genomgång av detta problemområde skulle bli mycket omfattande. Här kommer bara några viktiga synpunkter på den praktiska utformningen av byggnader och anläggningar för naturlig ventilation att redovisas.

Byggnadens placering och utformning

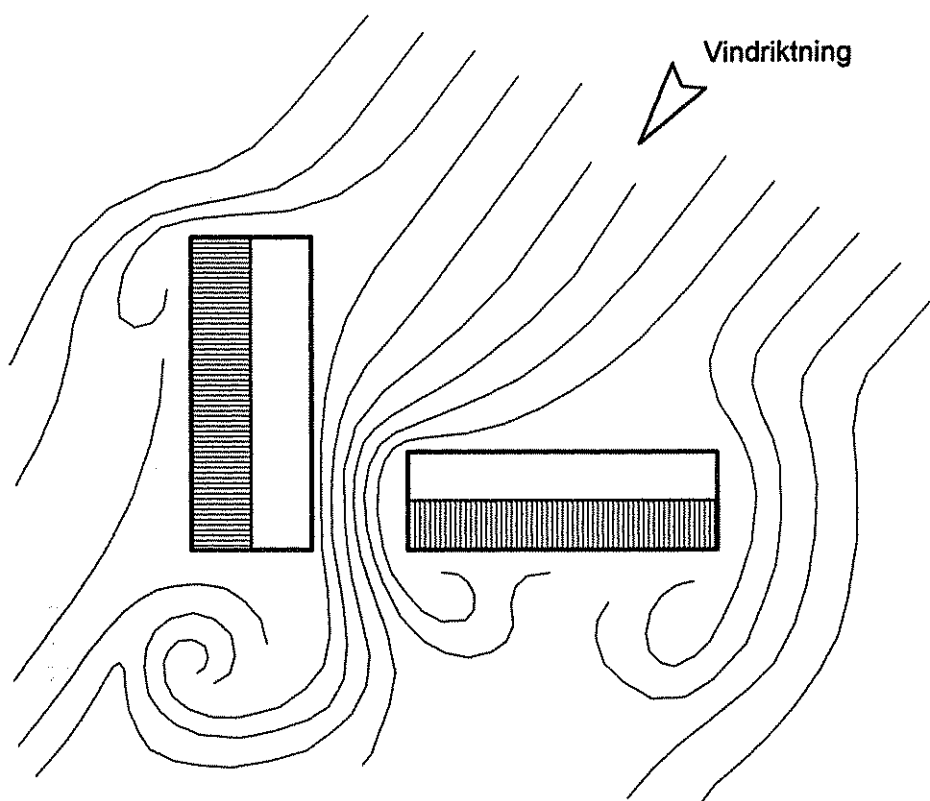
I byggnader där vinden är den dominerande drivkraften för ventilationen kommer luften att strömma in på vindsidan och ut på läsidan. Det blir fråga om en i huvudsak horisontell "tvär"-ventilation. Det bästa och jämnaste inomhusklimatet får man och huset kan placeras med en långsida mot den förhärskande vindriktningen. Vindventilerade byggnader bör dessutom inte delas upp med mellanväggar.



Figur 24 För att minska risken för vindstörningar från närliggande hus och andra hinder bör en byggnad med naturlig ventilation placeras på ett avstånd från hindret på minst två gånger hindrets höjd.

Morsing & Strøm (1985) rekommenderar att avståndet från en yttervägg med ventilationsöppningar till en angränsande byggnad skall vara minst 2,5 meter. Man bör dock sträva efter ett större avstånd mellan angränsande byggnader. Det är önskvärt med ett avstånd på minst 2 gånger den högsta byggnadens höjd (figur 24).

När två byggnader är placerade i vinkel mot varandra påverkas luftströmningen kring byggnaderna kraftigt (figur 25). Detta påverkar de yttre vindtryckskoefficienterna på ett svårförutsägbart sätt. Störningarna blir större ju högre byggnaderna är och ju närmare de ligger varandra. Man kan räkna med särskilt kraftiga störningar i passagen mellan byggnaderna där vindhastigheten kan öka med 75% (Hellers & Lundgren, 1974).



Figur 25 När två byggnader är placerade i vinkel intill varandra, påverkas luft rörelserna och därmed de yttre tryckkoefficienterna kraftigt (efter Hellers & Lundgren, 1974).

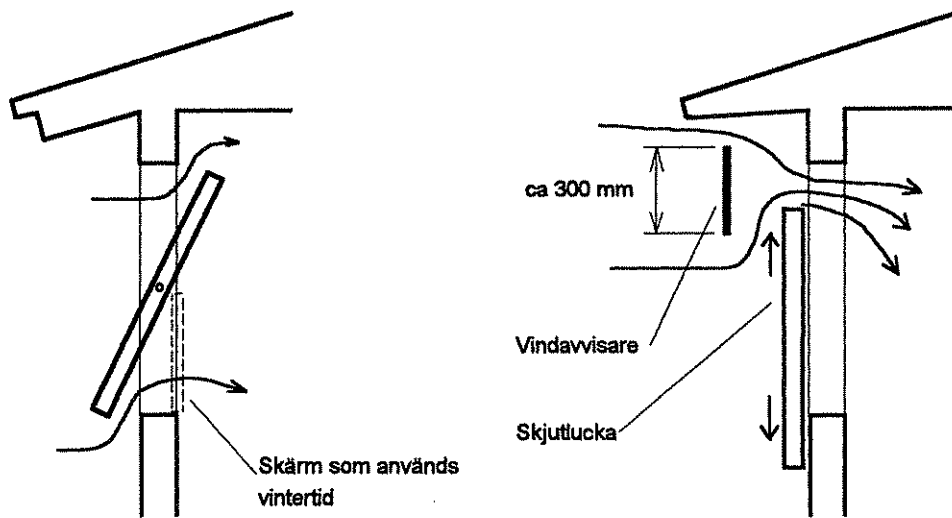
Yttertak

Oisolerade plåttak bör undvikas eftersom de medför onödig uppvärmning av stallet sommartid. Den starka solinstrålningen ger då en kraftig uppvärmning av takplåten. Om det saknas undertak och isolering överförs denna värme ner i stallet (se figur 12). Vintertid, speciellt under klara kalla nätter, kan taket istället bli kallare än luften genom utstrålning mot den kalla himlen. Denna nedkylning medför ökad kondens och frostbildning på takets undersida. Till och med en så blygsam isolering som ett undertak av boardskivor minskar dessa olägenheter.

Val och placering av ventilationsöppningar

Stora tilluftsöppningar krävs

Eftersom drivkrafterna är små krävs mycket större ventilationsöppningar i anläggningar som bygger på naturlig ventilation jämfört med mekanisk ventilation. Det betyder att de flesta av de ventilationsdon som finns på marknaden har för liten kapacitet för att passa i stallar med naturlig ventilation. Av bilaga 1 framgår att det finns stora skillnader mellan olika typer av don. Ett ventilationsdon som skall användas i en anläggning med för naturlig ventilation skall ha en stor öppningsarea och ett litet motståndstal.

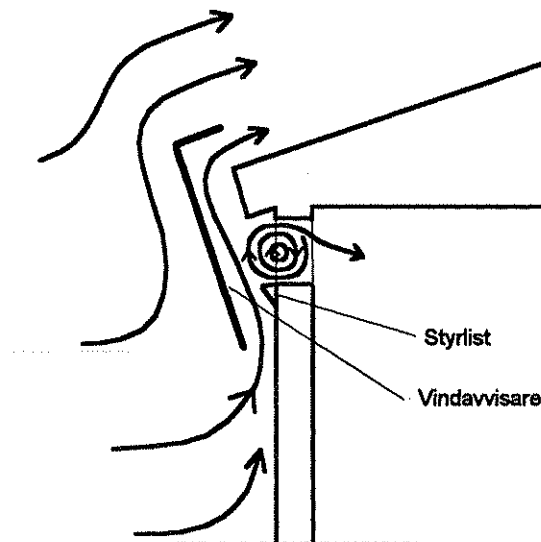


Ventilationsöppning med vipplucka

Ventilationsöppning med skjutlucka

Figur 26 Vanliga typer av ventilationsöppningar i USA och Kanada. Lösningen med vertikal skjutlucka och vindavvisare rekommenderas framför alternativet med vipplucka (Choinière et al., 1988; Choinière & Munroe, 1990).

I stallar med hög djurbeläggning kan det behövas så stora öppningsareor att inte ens de största tilluftsdonen har tillräcklig kapacitet utan det krävs någon form av luckor (exempel se figur 26).



Figur 27 Vindavvisare som utjämnar och dämpar vindpåverkan för en ventilationsöppning som är placerad vid takfoten. Vindavvisaren leder styr bort den luftström som är direkt riktad mot ventilationsöppningen. Den kraftiga luftström som följer väggen leds förbi öppningen. (Efter Brandsma, 1976)

Eftersom vindens tryck har så stor betydelse för ventilationens funktion skulle det ofta vara önskvärt att dämpa vindtrycket. Det är dock svårt att konstruera vindavvisare som fungerar i praktiken. Figur 27 visar en konstruktion som tagits fram i Holland för att dämpa det kraftiga vindtryck som kan uppstå under takfoten.

I oisolerade stallar där man inte behöver kunna reglera flödet är luftgenomsläppliga väggar av glespanel eller vindskyddsväv ett bra alternativ.

Stora öppningar behövs för att klara värmeböljor

Man kan minska risken för problem med höga stalltemperaturer genom att se till att det finns stora öppningar som kan användas i samband med samband med varmt och stilla väder. Dessa extra ventilationsöppningar kan utgöras av lämpligt placerade portar, fönster eller luckor. I ett engelsk försök kunde man minska övertemperaturen i ett slaktsvinsstall till mindre än 3°C genom att öppna portarna (Barrie et al. 1985) så att den totala öppningsarean ökade med ca 70%.

Självdragstrummor

För att få bästa självdragseffekt och undvika kondens bör en självdrags trumma vara väl isolerad. Detta gäller särskilt i isolerade stallar där det kan bli stor temperaturskillnad mellan frånluften och uteluften. Med hänsyn till risken för vindstörningar bör trumman nå upp minst 0,5 meter över taknock.

Ett regnskydd över trumman ökar strömningsmotståndet och minskar därmed trumman kapacitet. Även om man har regnskydd finns det alltid risk för att regn och snö blåser in. Trumman måste därför placeras så att dropp från nederbörd eller kondens inte hamnar där djuren vistas eller där det kan orsaka hygieniska problem.

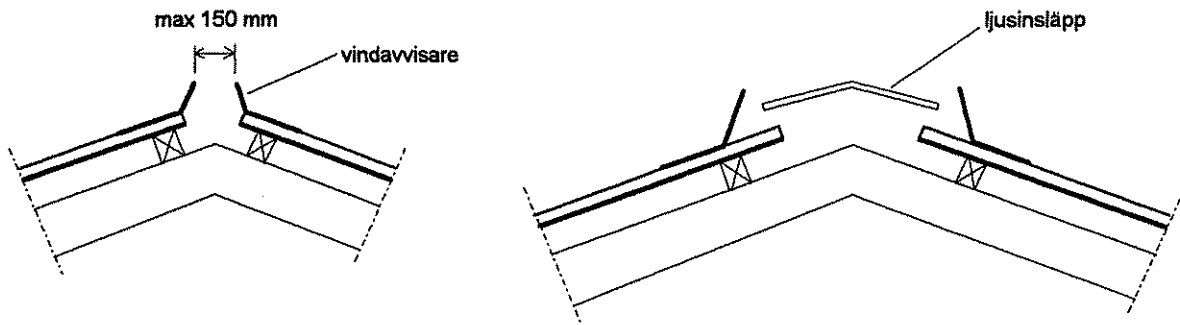
Om man måste använda flera trummor finns det alltid en viss risk för att luftströmmen i någon trumma kan vända på grund av vind och tryckförhållanden. Detta gäller särskilt när den drivkraft som skapas av skorstenseffekten är svag i förhållande vindtrycket, d.v.s när temperaturskillnaden mellan stallet och omgivningen är liten. Denna situation kan också inträffa om trumman är otillräckligt isolerad så att frånluften kyls av på väg upp genom trumman.

Det är ofta lättare att ordna en fungerande flödesreglering med spjäll i en självdragstrumma än i en öppen nock.

Öppen nock

Man bör ha en öppning inocken i byggnader utan innertak eller med parallelltak. I oisolerade byggnader räcker det med en ganska smal nockspringa (max 150 mm) (Bruce, 1975b; Choinière & Munroe 1990). Med en så smal springa och med skärmlåtar (se fig 27) blir problemen med nederbörd och snöinblåsning små. En takhuv över nockspringan hindrar inte snöinblåsning, men minskar kapaciteten genom att strömningsmotståndet ökar. Det är vanligt att man kombinerar nocköppningen med ljusinsläpp.

I värmeisolerade byggnader är det viktigt att nocköppningen utformas så att fuktig stalluft inte kan tränga in under yttertaket och orsaka skador på isolering och bärande konstruktion.



Figur 28 Exempel på olika typer av öppna nockar för oisolerade byggnader.

Ventilerande tak

I Skottland är det vanligt att man förser breda oisolerade byggnader med ventilerande tak (Bruce, 1977; Bruce, 1981). Detta åstadkoms genom att man lämnar springor (i takfallets riktning) mellan taktäckningsskivorna. Ett alternativ är att lämna horisontella (vinkelrätt mot takfallet) springor i överlappet mellan taktäckningsskivor av fibercement. Det finns inga för närvarande inga säkra uppgifter om hur denna typ av konstruktion fungerar i ett vinterklimat med mycket snö.

Skorstenseffekten ger små drivtryck och låga lufthastigheter

När skorstenseffekten är den huvudsakliga drivkraften kommer luftströrelserna i stallet att likna de som uppträder i stallar med fläktventilation. En viktig skillnad är dock att med naturlig ventilation blir drivkrafterna mycket svagare än med mekanisk ventilation. Det gör att lufthastigheterna i ventilationsöppningarna blir låga (ofta mindre än 1 m/s). Detta minskar möjligheterna att styra luftströrelserna i stallet.

För få största möjliga drivtryck bör stallet antingen ha parallelltak stor taklutning (mer än 25°) eller höga självdragstrummor. För att få största möjliga höjdskillnad och därmed bästa ventilationskapaciteten bör tilluftsdonen placeras lågt. Tilluftsdonen får dock inte placeras så att det finns risk för kalldrag direkt på djuren. I värmeisolerade stallar där temperaturskillnaden mellan ute- och inneluft kan bli stor, måste ventilationsöppningarna placeras så högt att den kalla tilluften hinner blandas med den varma stallluften innan luften når djuren.

Vinden ger tvärventilation

Vinden orsakar en i huvudsak horisontell tvärventilation av stallet. Eftersom vindens riktning växlar kommer en viss ventilationsöppning ibland att fungera som tilluftsdon och ibland som frånluftsdon. För att minska denna osäkerhet bör man undvika att placera ventilationsöppningar där vindtrycket växlar kraftigt mellan sug och tryck beroende på vindriktningen. Dessa fenomen uppträder främst i anslutning till skarpa hörn (väggarna intill hörnen och nocken närmast gaveln).

Stallet bör vara utformat så att man får en jämn genomluftning utan "döda" zoner eller drag direkt på djuren. Ventilationsöppningarna bör därför vara jämt fördelade runt hela stallet med undantag för området närmast hörnen och nocken närmast gavlarerna.

I kalla oisolerade stallar är behovet av att reglera ventilationsöppningarna litet. På vintern kan man behöva stänga till vissa öppningar för att undvika drag direkt på djuren. För att undvika onödig övertemperatur sommartid är det bra om det finns stora portar eller luckor som kan öppnas vid behov. I stallar med lösgående djur på djupströbädd som fritt kan välja uppehållsplats är behovet av att kunna reglera luftförelser och stallklimat mindre än i stallar där djurs rörelsefrihet är begränsad.

Dimensionering och reglering

I de byggnader där man önskar kunna reglera ventilationsflödet bör tryckförlusten fördelas så den är mindre i tilluftsöppningarna än i frånluftsöppningarna. På så sätt minskar man risken att den öppningar som är tänkta att fungera som tilluftsdon istället kommer att fungera som frånluftsdon. Risken för att vindpåverkan driver luften baklänges genom en nockspringa är också mindre om större delen av tryckförlusten ligger där. Vill man kunna reglera ventilationsflödet genom att stänga till öppningar (strykning som ökar tryckförlusten) bör den reglerbara öppningen inte ha för stort motstånd i fullt öppet läge.

Isolerade stallar

I isolerade stallar med höga krav på klimatkontroll är det en fördel om skorstenseffekten är tillräcklig för att säkerställa ett tillräckligt stort ventilationsflöde.

I ett värmeisolerat stall har fördelningen av tilluft stor betydelse för hur stallklimatet blir i olika delar av stallen. I ett naturligt ventilerat stall har vinden stor betydelse både för luftfördelningen och ventilationskapaciteten. Eftersom man inte kan styra vinden måste istället ventilationsöppningarna kunna reglera för att säkerställa ett bra stallklimat. Både kapaciteten (den totala öppningsarean) och fördelningen mellan olika delar av stallen måste kunna regleras. I de fall man använder automatisk styrning av ventilationen bör den vara försedd med flera temperaturgivare i olika delar av stallen samt eventuellt givare för vindhastighet och vindriktning.

REFERENSER

- Albright, L.D. 1990. Environment control for animals and plants. ASAE textbook number 4. ASAE, St. Joseph, USA. 453 s. (ISBN 0-929355-08-3)
- ASAE. 1986. Psychrometric data, ASAE Data: ASAE D271.2. Ur: Hahn & Rosenter (eds.), ASAE Standards 1986. ASAE, St. Joseph.
- Avén, Sigurd (red.) 1982. Handboken Byyg. Husbyggnader och installationer. Liber Förlag, Stockholm.
- Banks, H.J., Longstaff, R.A., Raupach, M.R., Finnigan, J.J. 1983. Wind-induced pressure distribution on a large grain storage shed: Prediction of wind-driven ventilation rates. *Journal of Stored Products Research*, vol 19, no 4, pp 181-188.
- Barrie, I.A., Smith, A.T., Yeo, M.L. 1985. Hot-weather performance of ACNV. *Farm building progress* (80) April 1985, pp 23-27.
- Bottcher, R.W., Willits, D.H., Baughman, G.R. 1986. Experimental analysis of wind ventilation of poultry buildings. *Transactions of ASAE*, vol 29(2), pp 571-578.
- Brandsma, C. 1976. Invloed van het buitenklimaat op het ventileren van varkensstallen. IMAG publikatie 74. Instituut voor mechanisatie, arbeid en gebouwen, Wageningen.
- Bruce, J.M. 1975a. A computer program for the calculation of natural convection due to wind. *Farm building R&D studies*, November 1975.
- Bruce, J.M. 1975b. The open ridge as a ventilator in livestock buildings. *Farm building R&D studies*, November 1975.
- Bruce, J.M. 1977. Slotted roofs for cattle buildings. Design Aid, Scottish Farm Buildings Investigation Unit, Aberdeen.
- Bruce, J.M. 1978. Natural convection through openings and its application to cattle building ventilation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol 23, pp 151-167.
- Bruce, J.M. 1981. Design method for natural ventilation of cattle buildings using raised roof sheets. *Farm Building Progress* (66) October 1981.
- CIGR. 1984. Report of working group on climatization of animal houses. Published by SFBIU, Aberdeen for Commission Internationale du Génie Rural.
- Choinière, Y., Blais, F., Munroe, J.A. 1988. A wind tunnel study of airflow patterns in a naturally ventilated building. *Canadian agricultural engineering*, 30:2. pp 293-297.
- Choinière, Y., Munroe, J.A. 1990. Principles and guidelines for natural ventilation of warm dairy housing. ASAE winter meeting 1990, paper no 90-4552. ASAE, St. Joseph.
- Hellers, B.G., Lundgren, S. 1974. Blåsighet kring enstaka byggnader och i passager - modellprov. Rapport R21:1974. Statens institut för byggnadsforskning, Stockholm.
- Jordbruksverket, 1993. Statens jordbruksverks föreskrifter om djurhållning inom lantbruket mm. Statens jordbruksverks författningssamling, SJVFS 1993:129, Jönköping.

- Krieg, R. 1992. Vindatlas för Sverige. SMHI, Energi-Anläggning, slutrapport på projekt 506 269-2, Norrköping.
- Mahoney, G.W.A., Fryrear, J.I. 1985. Lee wall vent openings in open front shelters, effects on wind pressures. Transactions of ASAE vol 28(2), pp 538-541.
- Monteith, J.L., Unsworth, M.H. 1990. Principles of environmental physics. Second edition. Edward Arnold, London.
- Moran, P. 1981. Full-scale measurement of wind pressures on a 27,8 m long single 21,5 m span agricultural building. Journal of Agric. Engineering Research, vol 26, pp 55-61.
- Morsing, S., Strøm, J.S. 1985. Styret naturlig ventilation. SBI-landbruksbyggeri 63.
- Mörtstedt, S-E & Hellsten, G. 1985. Data och diagram. Esslste Studium AB, Stockholm
- Peterson, Folke. 1978. Luftbehandlingssystem. Kompendium II:3, Uppvärmnings och ventilationsteknik. KTH, Stockholm.
- Sachs, Peter. 1972. Wind forces in engineering. Pergamon press, Oxford.
- Shrestha, G.L., Cramer, C.O., Holmes, B.J., Kammel, D.W. 1993. Wind-induced ventilation of an enclosed livestock building. Transactions of the ASAE, vol 30(3), pp 921-932.
- Svensk standard. 1992. Lantbruksbyggnader - Ventilation, uppvärmning och klimatanalys i värmeisolerade djurstallar - Beräkningsregler. SS 95 10 50 utgåva 2, Standardiseringskommisionen i Sverige, Stockholm.
- Taesler, R. 1972. Klimatdata för Sverige. Statens institut för byggnadsforskning, Stockholm.
- Wirén, B.G. 1985. Effects of surrounding buildings on wind pressure distributions and ventilation losses for single family houses. Part 1: 1½-storey detached houses. The National Swedish Inst. for Building Research, Bullentin M85:1985.
- Wirén, B.G. 1993. Vindeffekter på byggnader. Kompendium i byggnadsaerodynamik. Statens institut för byggnadsforskning, Gävle (opubl. kompendium).

BILAGOR

Bilaga 1: Förlustkoefficient för ventilationsöppningar

Förlustkoefficient för olika typer av ventilationsöppningar och don.

| Typ av öppning | ζ | Flöde beräknas per | Källa |
|---|---------|-------------------------|-------|
| Brädväggar: | | | |
| 100 x 25 mm, 5 mm springa | 458 | m ² panel | ADAS |
| 100 x 25 mm, 10 mm springa | 127 | m ² panel | ADAS |
| 100 x 25 mm, 15 mm springa | 67 | m ² panel | ADAS |
| 100 x 25 mm, 18 mm springa | 58 | m ² panel | ADAS |
| 100 x 25 mm, 20 mm springa | 48 | m ² panel | ADAS |
| 100 x 25 mm, 25 mm | 39 | m ² panel | ADAS |
| 100 x 25 mm, 25 mm springa med vindnät (50 % öppning) | 83 | m ² panel | ADAS |
| 100 x 25 mm, 100 mm öppning, två inbördes förskjutna skikt | 20 | m ² panel | ADAS |
| 120 x 12 mm, 10 mm öppning | 200 | m ² panel | LBT |
| 120 x 12 mm, 20 mm öppning | 100 | m ² panel | LBT |
| 120 x 12 mm, 30 mm öppning | 50 | m ² panel | LBT |
| Vindskyddsmaterial: | | | |
| Vindskydd med 10 mm runda hål, cc 21 mm (23% öppning) | 24 | m ² material | ADAS |
| Polyetenefolie med 100 mm kvadratiska hål, cc 130 mm (52% öppning) | 11 | m ² material | ADAS |
| Vindskydd med 23 x 5 mm ovala hål fördelade med 25 x 8 mm centrumavstånd (44% öppning) | 10 | m ² material | ADAS |
| Vindskydd med 2 x 1 mm rektangulära hål fördelade med 3 x 2 mm centrumavstånd (34% öppning) | 10 | m ² material | ADAS |
| Väv med 1,5 x 1 mm rektangulära hål fördelade med 2,3 x 1,8 mm centrumavstånd (37% öppning) | 8,8 | m ² material | ADAS |

| | | | |
|--|-----|-------------------------|------|
| Vindskydd med 6 x 4 mm ovala hål fördelade med 8 x 6 mm centrumavstånd (43% öppning) | 7,8 | m ² material | ADAS |
| Vindskydd med 50 x 100 mm rektangulära hål fördelade med 100 x 102 mm centrumavstånd (49% öppning) | 6,8 | m ² material | ADAS |
| Vindskydd med 8 x 6 mm ovala hål fördelade med 10 x 8 mm centrumavstånd (50% öppning) | 5,4 | m ² material | ADAS |
| Väv med 4 x 3 mm rektangulära hål fördelade med 6 x 5 mm centrumavstånd (47% öppning) | 5,5 | m ² material | ADAS |
| Väv med 1,5 x 1 mm rektangulära hål fördelade med 2,1 x 1,6 mm centrumavstånd (50% öppning) | 5,2 | m ² material | ADAS |
| Vindskydd med 15 x 8 mm ovala hål fördelade med 18 x 11 mm centrumavstånd (49% öppning) | 4,8 | m ² material | ADAS |
| Plastnät, typ 104, Nissen AB | 1.5 | m ² material | LBT |
| Plastnät, typ 109, Nissen AB | 1.5 | m ² material | LBT |
| Plastnät, typ 161, Nissen AB | 2 | m ² material | LBT |

Övriga väggmaterial:

| | | | |
|--|-----|-------------------------|------|
| Profilerad plåt med utstansade ögonlocks-öppningar 46 x 5 mm fördelade med 100 x 50 mm centrumavstånd (4,3% öppning) | 996 | m ² material | ADAS |
| Polyeten filt (Non-woven), 10 mm tjock | 5,5 | m ² material | ADAS |

Nocköppningar:

| | | | |
|---|-----|---------------|------|
| Nockspringa 220 mm bred med plant tak (110 mm höga springor på sidorna) | 3,1 | bredd x längd | ADAS |
| Oskyddad nockspringa 100-150 mm bred | 2,1 | bredd x längd | ADAS |
| Nockspringa 100-150 bred med bafflar 250 mm höga | 2,1 | bredd x längd | ADAS |

Ventilationsdon:

| | | | |
|--|-----|------------------------------|---------|
| Tilluftsdon PM typ PLIE (takmontage) | 5 | ca 0.12 m ² / don | PM |
| Tilluftsdon Alfa Laval typ DAL (väggmont.) | 5 | ca 0.08 m ² / don | SMP |
| Tilluftsdon typ SKOV DA1000 (väggmont.) | 1,2 | 0,104 m ² /don | SKOV |
| Tilluftsdon typ SKOV DA2500 (väggmont.) | 0,9 | 0,222 m ² /don | SKOV |
| Tilluftsdon typ DSI WV 1100 (väggmont.) | 1,2 | 0,094 m ² /don | SJF 850 |
| Tilluftsdon typ DSI WV 1500 (väggmont.) | 1,4 | 0,130 m ² /don | SJF 850 |

| | | | |
|---|-----|---------------------------|---------|
| Tilluftsdon typ Turbovent V 1000 F | 1,2 | 0,083 m ² /don | SJF 862 |
| Tilluftsdon typ Turbovent V 1200 F | 1,2 | 0,116 m ² /don | SJF 862 |
| Tilluftsdon typ MERA 1450A (väggmont.) | 1,9 | 0,120 m ² /don | SJF 868 |
| Tilluftsdon typ REB/Mera 1450B (väggmont) | 1,5 | 0,120 m ² /don | SJF 884 |

Källor

- ADAS Pearson, C. C. 1993. An improved calculation method for design of natural ventilation by thermal buoyancy. Ur: Proc. Livestock environment IV, red Collins, E. & Boon, C. ASAE publication 03-93, pp 795-802.
- LBT Opublicerade provningsresultat från Carl-Magnus Dolby, LBT, Lund.
- SJF 850 Prøverapport Nr. 850, 1991, Statens Jordbrugstekniske Forsøg, Horsens, Danmark
- SJF 862 Prøverapport Nr. 862, 1992, Statens Jordbrugstekniske Forsøg, Horsens, Danmark
- SJF 868 Prøverapport Nr. 868, 1992, Statens Jordbrugstekniske Forsøg, Horsens, Danmark
- SJF 884 Prøverapport Nr. 884, 1993, Statens Jordbrugstekniske Forsøg, Horsens, Danmark
- SKOV Datablad från Skov A/S, Hedelund 4, Glyngøre, Danmark.

Bilaga 2: Fuktig lufts densitet

Fuktig lufts densitet (kg/m^3) vid olika temperatur och relativ fuktighet. Värdena gäller för ett lufttryck på $101,3 \times 10^3$ Pa. De värden på vattenångans mättnadstryck som har använts vid beräkningen har hämtats från Mörstedt (1972).

| Tempe- ratur | Luftfuktighet | | | | | |
|-----------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0% | 20% | 40% | 60% | 80% | 100% |
| -30 | 1.450 | 1.450 | 1.450 | 1.450 | 1.450 | 1.450 |
| -29 | 1.444 | 1.444 | 1.444 | 1.444 | 1.444 | 1.444 |
| -28 | 1.438 | 1.438 | 1.438 | 1.438 | 1.438 | 1.438 |
| -27 | 1.432 | 1.432 | 1.432 | 1.432 | 1.432 | 1.432 |
| -26 | 1.427 | 1.427 | 1.427 | 1.426 | 1.426 | 1.426 |
| -25 | 1.421 | 1.421 | 1.421 | 1.421 | 1.421 | 1.421 |
| -24 | 1.415 | 1.415 | 1.415 | 1.415 | 1.415 | 1.415 |
| -23 | 1.410 | 1.409 | 1.409 | 1.409 | 1.409 | 1.409 |
| -22 | 1.404 | 1.404 | 1.404 | 1.404 | 1.404 | 1.403 |
| -21 | 1.398 | 1.398 | 1.398 | 1.398 | 1.398 | 1.398 |
| -20 | 1.393 | 1.393 | 1.393 | 1.393 | 1.392 | 1.392 |
| -19 | 1.387 | 1.387 | 1.387 | 1.387 | 1.387 | 1.387 |
| -18 | 1.382 | 1.382 | 1.382 | 1.382 | 1.381 | 1.381 |
| -17 | 1.377 | 1.376 | 1.376 | 1.376 | 1.376 | 1.376 |
| -16 | 1.371 | 1.371 | 1.371 | 1.371 | 1.371 | 1.370 |
| -15 | 1.366 | 1.366 | 1.366 | 1.365 | 1.365 | 1.365 |
| -14 | 1.361 | 1.360 | 1.360 | 1.360 | 1.360 | 1.360 |
| -13 | 1.355 | 1.355 | 1.355 | 1.355 | 1.355 | 1.354 |
| -12 | 1.350 | 1.350 | 1.350 | 1.350 | 1.349 | 1.349 |
| -11 | 1.345 | 1.345 | 1.345 | 1.344 | 1.344 | 1.344 |
| -10 | 1.340 | 1.340 | 1.339 | 1.339 | 1.339 | 1.339 |
| -9 | 1.335 | 1.335 | 1.334 | 1.334 | 1.334 | 1.333 |
| -8 | 1.330 | 1.330 | 1.329 | 1.329 | 1.329 | 1.328 |
| -7 | 1.325 | 1.324 | 1.324 | 1.324 | 1.323 | 1.323 |
| -6 | 1.320 | 1.319 | 1.319 | 1.319 | 1.318 | 1.318 |
| -5 | 1.315 | 1.315 | 1.314 | 1.314 | 1.313 | 1.313 |
| -4 | 1.310 | 1.310 | 1.309 | 1.309 | 1.308 | 1.308 |
| -3 | 1.305 | 1.305 | 1.304 | 1.304 | 1.303 | 1.303 |
| -2 | 1.300 | 1.300 | 1.299 | 1.299 | 1.298 | 1.298 |
| -1 | 1.296 | 1.295 | 1.295 | 1.294 | 1.293 | 1.293 |
| 0 | 1.291 | 1.290 | 1.290 | 1.289 | 1.289 | 1.288 |
| 1 | 1.286 | 1.286 | 1.285 | 1.284 | 1.284 | 1.283 |
| 2 | 1.281 | 1.281 | 1.280 | 1.279 | 1.279 | 1.278 |
| 3 | 1.277 | 1.276 | 1.275 | 1.275 | 1.274 | 1.273 |
| 4 | 1.272 | 1.271 | 1.271 | 1.270 | 1.269 | 1.268 |
| 5 | 1.268 | 1.267 | 1.266 | 1.265 | 1.264 | 1.276 |
| 6 | 1.263 | 1.262 | 1.261 | 1.260 | 1.260 | 1.259 |
| 7 | 1.259 | 1.258 | 1.257 | 1.256 | 1.255 | 1.254 |
| 8 | 1.254 | 1.253 | 1.252 | 1.251 | 1.250 | 1.249 |
| 9 | 1.250 | 1.249 | 1.248 | 1.246 | 1.245 | 1.244 |
| 10 | 1.245 | 1.244 | 1.243 | 1.242 | 1.241 | 1.240 |

forts. fuktig lufts densitet

| Tempe- ratur | Luftfuktighet | | | | | |
|-----------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0% | 20% | 40% | 60% | 80% | 100% |
| 11 | 1.241 | 1.240 | 1.238 | 1.237 | 1.236 | 1.235 |
| 12 | 1.237 | 1.235 | 1.234 | 1.233 | 1.231 | 1.230 |
| 13 | 1.232 | 1.231 | 1.229 | 1.228 | 1.227 | 1.225 |
| 14 | 1.228 | 1.226 | 1.225 | 1.224 | 1.222 | 1.221 |
| 15 | 1.224 | 1.222 | 1.221 | 1.219 | 1.217 | 1.216 |
| 16 | 1.219 | 1.218 | 1.216 | 1.214 | 1.213 | 1.211 |
| 17 | 1.215 | 1.213 | 1.212 | 1.210 | 1.208 | 1.206 |
| 18 | 1.211 | 1.209 | 1.207 | 1.205 | 1.204 | 1.202 |
| 19 | 1.207 | 1.205 | 1.203 | 1.201 | 1.199 | 1.197 |
| 20 | 1.203 | 1.201 | 1.199 | 1.197 | 1.194 | 1.192 |
| 21 | 1.199 | 1.196 | 1.194 | 1.192 | 1.190 | 1.188 |
| 22 | 1.195 | 1.192 | 1.190 | 1.188 | 1.185 | 1.183 |
| 23 | 1.191 | 1.188 | 1.186 | 1.183 | 1.181 | 1.178 |
| 24 | 1.187 | 1.184 | 1.181 | 1.179 | 1.176 | 1.173 |
| 25 | 1.183 | 1.180 | 1.177 | 1.174 | 1.171 | 1.169 |
| 26 | 1.179 | 1.176 | 1.173 | 1.170 | 1.167 | 1.164 |
| 27 | 1.175 | 1.172 | 1.168 | 1.165 | 1.162 | 1.159 |
| 28 | 1.171 | 1.168 | 1.164 | 1.161 | 1.158 | 1.154 |
| 29 | 1.167 | 1.163 | 1.160 | 1.157 | 1.153 | 1.150 |
| 30 | 1.163 | 1.159 | 1.156 | 1.152 | 1.148 | 1.145 |

Bilaga 3: Vindhastighetsdata

Följande tabell är ett utdrag ur "Vindatlas för Sverige" (Krieg, 1992) för ett urval mätstationer. Tabellen innehåller de konstanter som man behöver för att beräkna vindhastighetsfördelningen med hjälp av "Weibull"-fördelningen:

$$P(\geq w) = e^{-\left(\frac{w}{A}\right)^C}$$

där: $P(\geq w)$ = andel av tiden som vindhastigheten är w m/s eller högre
 w = vindhastighet (m/s)
 A = parameter som är karakteristisk för den aktuella mätstationen
 C = parameter som är karakteristisk för den aktuella mätstationen

Parametrarna i tabellen avser vinden på 10 meters höjd i tre olika terrängtyper.

| Ort | Öppen slätt med enstaka byggnader eller träd | | Mellanbygd med fält, skogsdungar och spridd bebyggelse | | Städer eller skogslandskap med enstaka öppna fält | |
|--------------|--|------|--|------|---|------|
| | A | C | A | C | A | C |
| Säve | 5.1 | 1.52 | 4.5 | 1.52 | 3.5 | 1.53 |
| Landvetter | 5.5 | 1.74 | 4.8 | 1.74 | 3.8 | 1.76 |
| Nidingen | 5.8 | 1.74 | 5.1 | 1.74 | 4.0 | 1.76 |
| Ringhals | 5.6 | 1.87 | 4.9 | 1.88 | 3.9 | 1.88 |
| Glommen | 5.4 | 1.75 | 4.7 | 1.76 | 3.7 | 1.78 |
| Halmstad | 4.9 | 1.56 | 4.2 | 1.57 | 3.3 | 1.57 |
| Ängelholm | 4.8 | 1.51 | 4.2 | 1.51 | 3.3 | 1.51 |
| Ljungbyhed | 4.9 | 1.50 | 4.2 | 1.51 | 3.3 | 1.51 |
| Helsingborg | 5.3 | 1.76 | 4.6 | 1.76 | 3.6 | 1.76 |
| Malmö | 6.1 | 1.81 | 5.3 | 1.82 | 4.2 | 1.84 |
| Falsterbo | 6.0 | 1.79 | 5.2 | 1.81 | 4.1 | 1.81 |
| Maglarp | 6.2 | 1.89 | 5.4 | 1.89 | 4.2 | 1.90 |
| Sturup | 6.3 | 1.90 | 5.5 | 1.91 | 4.3 | 1.92 |
| Sandhammaren | 5.7 | 1.63 | 5.0 | 1.64 | 3.9 | 1.66 |
| Ronneby | 4.8 | 1.53 | 4.2 | 1.53 | 3.3 | 1.53 |
| Kalmar | 5.1 | 1.71 | 4.4 | 1.70 | 3.5 | 1.70 |
| Växjö | 5.0 | 1.82 | 4.3 | 1.82 | 3.4 | 1.82 |

| forts.. | Öppen slätt med enstaka byggnader eller träd | | Mellanbygd med fält, skogsdungar och spridd bebyggelse | | Städer eller skogslandskap med enstaka öppna fält | |
|-------------------|--|------|--|------|---|------|
| Ort | A | C | A | C | A | C |
| Näsudden | 5.6 | 1.82 | 4.9 | 1.83 | 3.8 | 1.84 |
| Såtenäs | 4.7 | 1.66 | 4.1 | 1.66 | 3.2 | 1.66 |
| Lurö | 5.2 | 1.82 | 4.6 | 1.82 | 3.6 | 1.83 |
| Karlstad | 4.7 | 1.68 | 4.1 | 1.67 | 3.2 | 1.68 |
| Karlsborg | 4.5 | 1.51 | 3.9 | 1.52 | 3.1 | 1.53 |
| Jönköping | 5.1 | 1.62 | 4.5 | 1.63 | 3.5 | 1.63 |
| Linköping | 4.9 | 1.76 | 4.3 | 1.76 | 3.4 | 1.77 |
| Norrköping | 4.4 | 1.64 | 3.9 | 1.64 | 3.0 | 1.63 |
| Nyköping | 4.4 | 1.60 | 3.9 | 1.62 | 3.0 | 1.60 |
| Stockholm/ Bromma | 5.1 | 1.85 | 4.4 | 1.86 | 3.5 | 1.87 |
| Västerås | 4.6 | 1.66 | 4.0 | 1.67 | 3.1 | 1.66 |
| Arlanda | 5.0 | 1.77 | 4.3 | 1.77 | 3.4 | 1.78 |
| Uppsala | 4.6 | 1.68 | 4.0 | 1.67 | 3.1 | 1.67 |
| Borlänge | 4.1 | 1.50 | 3.6 | 1.52 | 2.9 | 1.51 |
| Söderhamn | 4.2 | 1.51 | 3.7 | 1.51 | 2.9 | 1.51 |
| Kuggören | 4.5 | 1.49 | 3.9 | 1.49 | 3.1 | 1.51 |
| Sundsvall | 4.0 | 1.32 | 3.5 | 1.33 | 2.7 | 1.33 |
| Kramfors | 3.9 | 1.40 | 3.4 | 1.40 | 2.7 | 1.41 |
| Umeå | 4.6 | 1.55 | 4.1 | 1.55 | 3.2 | 1.55 |
| Luleå | 4.6 | 1.56 | 4.0 | 1.56 | 3.2 | 1.56 |
| Östersund | 4.3 | 1.51 | 3.7 | 1.51 | 3.0 | 1.53 |
| Gunnarn | 3.3 | 1.17 | 2.9 | 1.17 | 2.3 | 1.18 |
| Gällivare | 4.3 | 1.39 | 3.7 | 1.39 | 3.0 | 1.40 |
| Kiruna | 4.8 | 1.50 | 4.1 | 1.50 | 3.3 | 1.51 |